

Congres Watersysteemkennis 2006/2007

Vlaamse innovaties in watersysteemkennis: thema oppervlaktewaterkwantiteit

Gasteditors: Jean Berlamont en Patrick Willems



Vrije
Universiteit
Brussel

universiteit
hasselt



UNIVERSITEIT
GENT

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT
LEUVEN



Universiteit
Antwerpen

WATER
MILIEU



Coördinatiecommissie
Integraal Waterbeleid

Congres Watersysteemkennis 2006/2007

Vlaamse innovaties in watersysteemkennis: thema oppervlaktewaterkwantiteit

Gasteditors: Jean Berlamont en Patrick Willems



Tijdschrift over integraal waterbeleid

Nummer 25

Jaargang 2006

In 1984 werd onder voorzitterschap van professor André Van der Beken het congres 'Water voor Groen' georganiseerd. Dat bracht een "state of the art" van het onderzoek aan watersystemen in Vlaanderen en was uniek omdat het wetenschappers en beheerders van alle mogelijke disciplines en sectoren samenbracht. Het congresboek is dan ook nu nog steeds een standaardwerk. Niettegenstaande vele studiedagen, is er sindsdien echter geen initiatief meer geweest dat de verschillende wetenschappers en administraties, actief in diverse domeinen met betrekking tot water, samenbracht. Nochtans is de kennis de voorbije jaren enorm toegenomen, niet in het minst door de grote investeringen van het Vlaamse Gewest in wetenschappelijk onderzoek, zowel via de verschillende TWOL studies als via de verhoging van de reguliere middelen voor onderzoek (IWT, FWO,...).

Anderzijds is de wens en de noodzaak om onze watersystemen te herstellen nog nooit zo sterk aanwezig geweest als nu. De uitdagingen voor het waterbeheer en beleid zijn dan ook evenredig groot. In dit kader is er dan ook een steeds grotere noodzaak tot het integraal aanpakken van de problemen die zich stellen binnen het waterbeheer. Een eerste vereiste binnen dit multidisciplinair karakter van het waterbeheer is dan ook het kennen van de verschillende actoren en het op de hoogte zijn van de vooruitgang in het wetenschappelijk onderzoek. Het congres Watersysteemkennis, die de verschillende actoren samenbracht, wil een grote stimulans zijn voor het onderzoek met betrekking tot water in Vlaanderen en op die manier bijdragen aan een verdere wetenschappelijke onderbouwing van het integrale waterbeleid.

Het congres Watersysteemkennis omvatte 9 studiedagen waar aan de hand van 146 lezingen en 101 posters, een beeld geschetst werd van het lopende onderzoek in Vlaanderen. Hieruit bleek duidelijk dat in vele disciplines van watersysteemkennis hoogstaand wetenschappelijk onderzoek verricht wordt. Niettemin blijkt er eveneens een sterke noodzaak tot meer samenwerking. Ook binnen het waterbeleid en beheer wordt deze nood steeds sterker gevoeld en dit niet in het minst omdat de verwachtingen en de doelstellingen van het waterbeheer steeds breder worden. Hierbij wordt men steeds meer geconfronteerd met enerzijds kennishiaten in watersysteemkennis en anderzijds nieuwe uitdagingen voor multidisciplinair onderzoek.

Decades van thematisch en gecompartmenteerd beleid hadden hun evenknie in het disciplinair onderzoek. Een multidisciplinaire aanpak is echter essentieel voor integraal waterbeheer en vereist een vlotte uitwisseling en gezamenlijk gebruik van data en resultaten, zowel tussen de onderzoeksgroepen onderling, als tussen de wetenschappelijke instellingen en de administraties. Deze uitdaging aangaan vereist ook het mogelijk maken en stimuleren van interdisciplinair onderzoek. Het congres watersysteemkennis wil hiertoe bijdragen. Op het afsluitende 2 daagse symposium van het congres Watersysteemkennis, worden niet alleen syntheses gebracht van de studiedagen maar worden ook verschillende nationale en internationale geïntegreerde onderzoeksprogramma's toegelicht.

De resultaten van het congres worden gepubliceerd in 10 afzonderlijke nummers van het tijdschrift WATER, die gezamenlijk de neerslag van het volledige congres vormen.

Samenstelling Wetenschappelijk Comité:

Willy Baeyens, Vrije Universiteit Brussel
Okke Batelaan, Universiteit Gent
Jean Berlamont, Katholieke Universiteit Leuven
Lieven Bervoets, Universiteit Antwerpen
Ronny Blust, Universiteit Antwerpen
Marleen Coenen, Universiteit Antwerpen
Steven Declerck, Katholieke Universiteit Leuven
Niels De Pauw, Universiteit Gent
Florimond De Smedt, Vrije Universiteit Brussel
Alain De Vocht, Universiteit Hasselt
Gerard Govers, Katholieke Universiteit Leuven
Rudy Herman, Dept. Economie, Wetenschap en Innovatie
Patrick Meire, Universiteit Antwerpen
Frank Mostaert, Waterbouwkundig Laboratorium
Frans Ollevier, Katholieke Universiteit Leuven
Marc Van Camp, Universiteit Gent
André Van der Beken, Vrije Universiteit Brussel
Ronny Verhoeven, Universiteit Gent
Willy Verstraete, Universiteit Gent
Wim Vyverman, Universiteit Gent
Kristine Walraevens, Universiteit Gent
Patrick Willems, Katholieke Universiteit Leuven
Guido Wyseure, Katholieke Universiteit Leuven

Samenstelling redactieraad WATER:

Hoofredacteur:
Michel Bruyneel

Leden:

Willy Bauwens, Marcel Bruyndoncx, Marc Buysse,
Herman Crommelinck, Lieve De Roeck, Marie-Paule Devroede,
Heleen Geeraert, Maarten Goris, Jan Hammenecker, Jos Heylen,
Patrick Meire, Jaak Monbaliu, Frank Mostaert, Rik Serruys,
Didier Soens, Lieve Stoops, Jan Strubbe, Paul Thomas,
José Vandevijvere, Marc Vercruysse en Louis Wauters

Samenstelling Organisatiecomité:

Johan Bogaert, dep. LNE afdeling Milieu-, Natuur-, en Energiebeleid
Michel Bruyneel, tijdschrift WATER
Marc Buysse, Stichting Vlaams Water
Christophe Claeys, Vereniging van Vlaamse Steden en Gemeenten
Marleen Coenen, Universiteit Antwerpen
Willem Coppens, Waterwegen en Zeekanaal nv
Kathleen Goris, IWT
Kathy Haustraete, CIW-secretariaat
Henk Maeckelberghe, Vlaamse Milieumaatschappij
Koen Maeghe, nv De Scheepvaart
Patrick Meire, Universiteit Antwerpen
Kurt Sannen, Agentschap voor Natuur en Bos
Lieve Stoops, Vereniging van Vlaamse Provincies
Jan Spaas, Vlaamse Vereniging van Polders en Wateringen
Karel Vandaele, Watering Sint Truiden
Philippe Van Haver, dep. LNE afdeling Milieu-, Natuur- en
Edward Van Keer, dep. MOW afdeling Haven- en Waterbeleid
Astrid Van Vosselen, dep. MOW afdeling Algemeen Beleid
Véronique Vens, Vlaamse Milieumaatschappij

Tijdschrift over
integraal waterbeleid
in samenwerking
met de CIW


Coördinatiecommissie
Integraal Waterbeleid

v.z.w. WATER
Broechemsesteenweg 165 • 2531 Boechout
tel.: 03/475 09 66 en 0486 939 025 • fax: 03/475 09 66
e-mail: claire.bruyneel@telenet.be
website: www.tijdschriftwater.be

Voorwoord



Vlaamse innovaties in watersysteemkennis: oppervlaktewaterkwantiteit

K.U.Leuven, 12 oktober, 2006

Als we terugkijken naar de laatste 20 jaar stellen we vast dat er sinds "Water voor Groen" in 1984 heel wat veranderd is m.b.t. het beheer van het oppervlaktewater in Vlaanderen. Deze veranderingen zijn het gevolg van internationale evoluties maar ook voor een belangrijk deel van Vlaams wetenschappelijk onderzoek. Wat betreft de synergie tussen de waterbeheerders, de overheid en de onderzoekswereld kan Vlaanderen als voorbeeld gesteld worden.

Sinds een 10-tal jaren heeft het routinematige gebruik van (commerciële) wiskundige modellen ingang gevonden. In de plaats van zich toe te leggen op ontwikkeling, promotie en opleiding moet de wetenschappelijke wereld nu de nadruk leggen op wat wiskundige modellen *niet* kunnen en hoe de resultaten ervan correct moeten geïnterpreteerd en, vaak ge-

relatieveerd worden. De beperkingen van de modellen zijn o.a. het gevolg van een gebrek aan voldoende goede data over een voldoende lange periode. Ook hiervoor zijn, en worden nog steeds belangrijke inspanningen gedaan door de waterbeheerders. Data worden online ter beschikking gesteld en kunnen overzichtelijk voorgesteld worden dank zij GIS. Ook hierin kunnen oppervlaktewaterbeheerders en onderzoekers elkaar vinden, en komen we tot een win- win situatie.

De gebruikte modellen worden steeds complexer en men verwacht er dan ook steeds meer van. Het gaat al lang niet meer over waterkwantiteit en waterkwaliteit alleen. Modellen wil men ook gebruiken om na te gaan wat de effecten zijn van bepaalde ingrepen op biotopen en hun biodiversiteit en om morfologische veranderingen te voorspellen. Modellen wil men ook niet alleen meer gebruiken om infrastructuur, bv. wachtbekkens te ontwerpen maar ook om ze te sturen. Dit vereist het opstellen van sturingsalgoritmes en optimaliseringstechnieken maar ook "snelle" modellen en voldoende goede data.

Een en ander is "at the cutting edge" van het wetenschappelijk onderzoek. Tot een geïntegreerde samenwerking komen tussen verschillende disciplines zoals biologie, morfologie, hydrologie, hydraulica, informatiesystemen,... is een noodzaak maar blijft een permanente uitdaging.

Andere uitdagingen voor de volgende 20 jaar zijn het onderzoek naar de gevolgen van de globale temperatuurstijging en mogelijke klimaatveranderingen op de hydrologie en de implicaties voor het oppervlaktewaterbeheer, in het bijzonder het (toenemend?) overstromingsgevaar en mogelijke waterschaarste.

Beleidsmatig blijft het een uitdaging om tot een waarlijk geïntegreerd i.p.v. integraal waterbeleid te komen. A. Van der Beken legde daar in 1984 al de nadruk op. We hebben wel een integraal waterbeleid, in die zin dat aan verschillende aspecten van het watersysteem aandacht wordt besteed, maar het beleid is nog altijd niet geïntegreerd, in de zin dat alle ingrepen en maatregelen (of het uitblijven ervan), geëvalueerd worden ten aanzien van alle verschillende functies en gebruikers van het oppervlaktewater en dat men naar een globale optimalisatie streeft.

Er blijft dus een grote nood aan voort durend wetenschappelijk onderzoek; de personele en financiële middelen daarvoor zijn in Vlaanderen beschikbaar. Er is vooral nood aan een *strategisch onderzoeksplan* en de bijpassende *structurele* (lange termijn) financiering, in tegenstelling tot een ad hoc beleid met de huidige projectmatige financiering. Ook is een betere samenwerking tussen de (meestal kleine) Vlaamse onderzoeksgroepen van verschillende disciplines absoluut nodig om tot een wetenschappelijke ondersteuning te komen van een *geïntegreerd* waterbeleid. Om te kunnen samenwerken, moet men elkaar eerst kennen en van elkaar weten wat men doet. Deze studiedag en het congres "Watersysteemkennis" kunnen daar in hoge mate toe bijdragen.

Prof. dr. ir. Jean Berlamont,
Themacoördinator

ARTIKELS

-
- 1 HIC – Hydrologisch Informatiecentrum – Verzamelen en verspreiden van meetgegevens**
H. Vereecken
-
- 6 Het operationeel oppervlaktewatermeetnet voor het lokale en het bekkengerichte waterbeheer in Vlaanderen**
P. Cabus, W. Defloor, F. Raymaekers, M. Voet en T. Van Hoestenbergh
-
- 10 Neerslaginvoer voor hydrologische en hydraulische modellen**
G. Vaes en P. Willems
-
- 16 Geïntegreerde modellering van hydrologische processen op rivierbekkenschaal**
F. De Smedt en O. Batelaan
-
- 23 Gecombineerd gebruik van hydrologische modellen en afstandswaarnemingen voor waterbeheersdoeleinden**
V. Pauwels, G. De Lannoy en N. Verhoest
-
- 27 Onzekerheden bij de Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse voor de Actualisatie van het Sigmaplan en aanbevelingen voor verfijning van de beschikbare methodes**
S. Smets, S. Broekx, D. Bulckaen, L. De Nocker, I. Liekens, J. Gauderis en W. Dauwe
-
- 33 Gebruik van overstromingskaarten voor verschillende watergerelateerde beheers- en beleidsinstrumenten**
E. D'Haeseleer, W. Vanneuville, K. Van Eerdenbrugh en F. Mostaert
-
- 38 Innovatieve technieken om overstroming snel in kaart te brengen**
J. Van Valckenborgh en H. Vereecken
-
- 42 Real-time sturing van wachtbekkens**
T. Barjas-Blanco, P. Willems, J. Berlamont, B. De Moor, K. Cauwenberghs, S. Rombauts en F. Raymaekers
-
- 48 Omgaan met watertekorten in het Albertkanaal en de Kempense kanalen**
J. Baetens, T. Scheltjens, K. Van Eerdenbrugh, P. Peeters, C. Danckaerts, K. Maeghe, P. Meire en F. Mostaert
-
- 55 Impact van klimaatverandering op hydrologische extremen langs Vlaamse rivieren - testcase Dender**
P. Willems, O. Boukhris, J. Berlamont, J. Blanckaert, K. Van Eerdenbrugh en P. Viaene
-
- 61 Bepaling van risicozones voor overstromingen in niet-gemodelleerde gebieden**
G. Vaes en T. Feyaerts
-

HIC – Hydrologisch Informatie- centrum – Verzamelen en verspreiden van meetgegevens

Het Hydrologisch Informatiecentrum (HIC) maakt deel uit van het Departement Mobiliteit en Openbare Werken. Een van de kerntaken van het Hydrologisch Informatiecentrum is het verzamelen, integreren en verwerken van alle beschikbare hydrologische gegevens ten behoeve van de eigen administratie en van derden. Het HIC heeft hiertoe een uitgebreid meetnet ontwikkeld, dat nog steeds verder wordt uitgebreid en geautomatiseerd in overleg met andere regionale en lokale overheden. Een dergelijk operationeel meetsysteem is van primordiaal belang voor het dagelijkse waterbeheer.

Het HIC-meetnet beslaat de bevaarbare waterlopen en omvat een 150-tal limnimetrische stations met continue monitoring van het waterpeil en op de meeste locaties berekening van het debiet. De laatste jaren wordt ook sterk geïnvesteerd in akoestische debietmeetstations die continu het debiet monitoren. Het HIC verzorgt bovendien de operationele werking van het meetnet op de niet-bevaarbare waterlopen van 1ste categorie. Dit meetnet bestaat uit 95 hydrometrische stations, waarvan het grootste deel eveneens is uitgerust met teletransmissie. Om een bijkomende inschatting te kunnen maken van de hoeveelheid neerslag die verspreid in Vlaanderen valt, registreren 30 pluviografen de uurlijkse neerslag. De kwaliteitscontrole aan de hand van gedetailleerde ijkingsmetingen en de validatie van de meetdata nadien zijn bijkomende essentiële stappen in het ganse meetproces.

Naast het meten, afijken en verzamelen is natuurlijk ook het efficiënte beheer van de verschillende meetdata in de centrale databank van het HIC (HYDRA) een enorme troef. De meeste stations zijn via teletransmissie aangesloten op de centrale databank, zodat de ogenblikkelijke peilen en debieten (meestal kwartierwaarden) gekend zijn. Via visualisatie op het web kan de situatie op de voet gevolgd worden op de belangrijkste rivieren.

Gezien het internationale karakter van de grotere stroombekkens werden er recent ook protocols opgesteld voor gegevensuitwisseling met de ons omringende regio's en landen. Zo kan het HIC over de landsgrenzen heen de situatie binnen de belangrijke stroombekkens bekijken en de invloed op de Vlaamse watersystemen inschatten.

Meten als beleidsondersteuning

De hydrometrie, te weten de meting van de afvoer op de waterlopen en de waterstandsmeting, neemt met de pluviometrie een centrale plaats in bij het Hydrologisch Informatiecentrum (HIC). Meer zelfs, de monitoring van deze hydrologische parameters vormt de meest essentiële bouwsteen van de beleidsondersteunende werking die het HIC biedt.

Een efficiënte verzameling en goed beheer van de terreindata leidt tot inzicht in het watersysteem. Via deze inzichten kan de vaak complexe werkelijkheid worden gevat in een vereenvoudigde weergave door middel van een numeriek of fysisch model. Berekeningen en resultaten hiervan worden geanalyseerd, waarbij kostenefficiëntie de laatste jaren sterk op de voorgrond treedt. Modellen stellen ons zelfs in staat een inschatting te maken wat ons in de nabije en verdere toekomst

Figuur 1: Piramidale voorstelling van de werking van het HIC



te wachten staat, bijvoorbeeld op het vlak van hoogwater, laagwater en stormvloed. Het bovenvermelde takenpakket wordt op verschillende niveaus ingezet en besproken, zodat we durven te spreken van een gedegen en kwaliteitsvolle beleidsondersteuning, zowel op regionaal, nationaal als internationaal vlak.

Waar wordt wat gemonitord en hoe ?

Via overleg met de betrokken waterbeheerders wordt bepaald welke grootte zal worden gemonitord, een keuze die afhankelijk is van de doelstelling van de beheerder. Aan de hand van een terreinverkenning zal de meest geschikte locatie gekozen worden. De gekozen locatie moet zich lenen tot een goede meting van de gevraagde parameter. Voor een goede waterstandsmonitoring zijn de meeste locaties geschikt, waarbij vooral de ligging in het bekken belangrijk is. Wanneer ook debieten en stroomsnelheden dienen gemonitord, zijn er enkele randvoorwaarden die in acht moeten genomen worden. Zo wordt voorkeur gegeven aan een stabiel rivierprofiel, zonder een uitgesproken sedimentatie- of erosiedynamiek met een bij benadering permanent stromingsregime. Andere randvoorwaarden waar dient rekening mee gehouden op de bevaarbare waterlopen zijn onder andere het scheepvaartverkeer (aanlegkades, sluizen,...) en de nabijheid van toegankelijke bruggen, van waarop ijkingsmetingen makkelijker kunnen worden uitgevoerd. Voor een kwaliteitsvolle monitoring van neerslag en sedimentconcentraties en -fluxen zijn eveneens belangrijke randvoorwaarden nodig voor een geschikte locatie. In het vervolg van dit artikel zullen we ons beperken tot de waterstands- en snelheidsmonitoring.

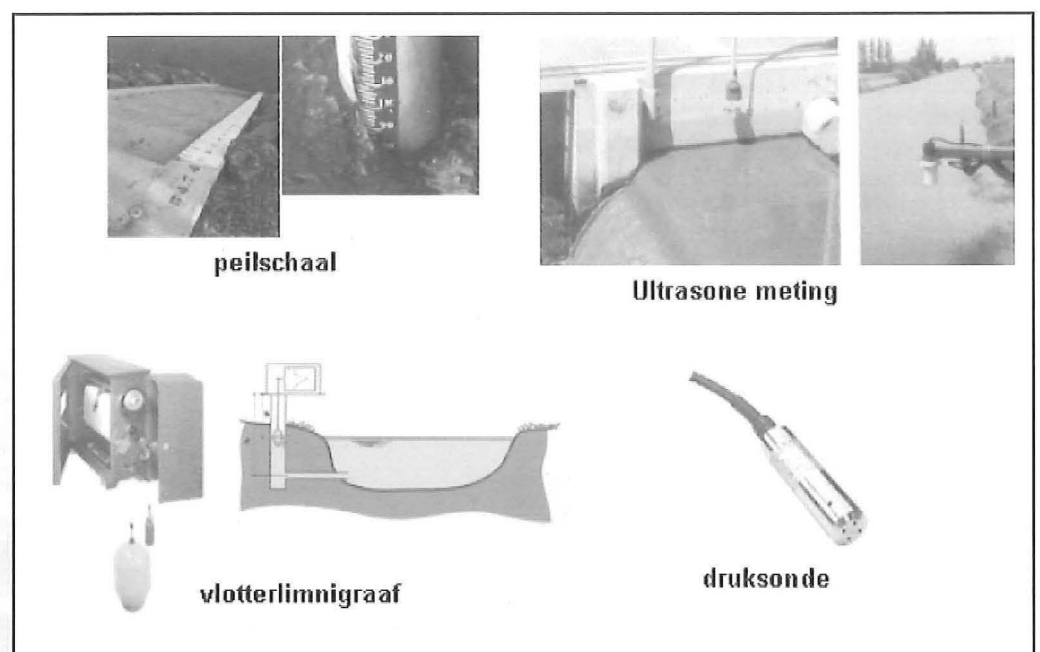
Voor de monitoring van waterstanden worden verschillende toestellen gebruikt (figuur 2). Reeds

eeuwenlang wordt een beroep gedaan op de aflezing van een peilschaal, waarbij de nul van de peilschaal door middel van een waterpassing naar een NGI-verkenmerk wordt gekoppeld aan het topografisch referentievlak (TAW = Tweede Algemene Waterpassing). Daarnaast worden ook vlotterlimnigrafen gebruikt. Sinds 2000 is het HIC begonnen met de plaatsing van enerzijds druksondes, die de waterstand lineair in functie van de hydrostatische waterdruk meten en anderzijds ultrasone peilmeters die boven het wateroppervlak geplaatst worden. Zij geven onrechtstreeks de waterstand door meting van de afstand tot het wateroppervlak.

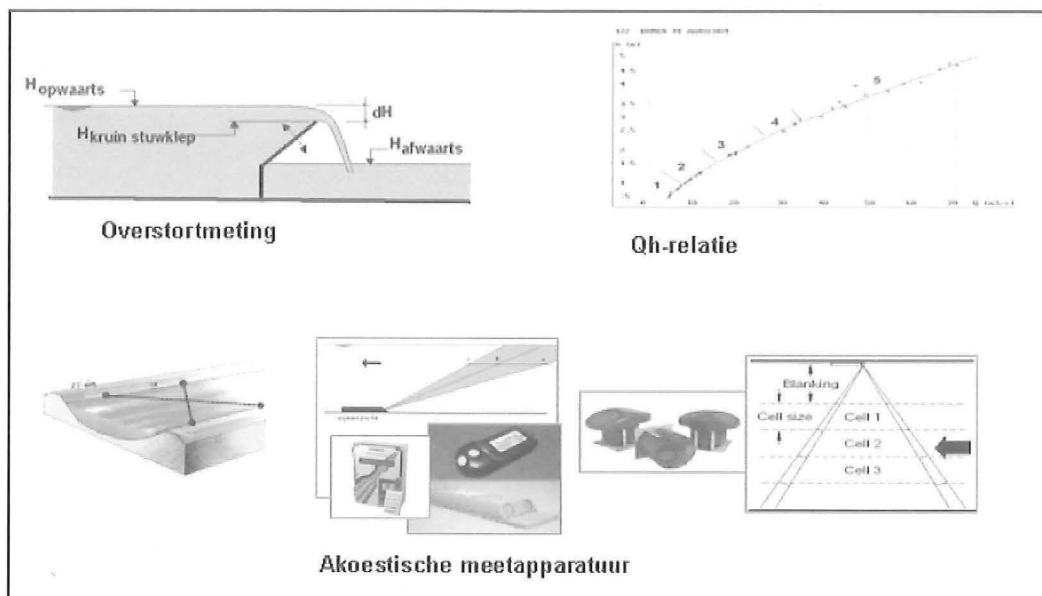
Voor een debietsmeting kunnen ook verschillende methoden worden gebruikt. Naast de klassieke eenduidige Qh-relatie voor een vrij afstromende waterloop, worden we in Vlaanderen meestal geconfronteerd met opgestuwde waterlopen, vaak om redenen van waterbeheersing of bevaarbaarheid. Hierbij bestaat er geen eenduidig verband tussen het waterpeil en het optredende debiet en moeten andere methoden worden gebruikt ter bepaling van het debiet (Figuur 3).

Enerzijds kan door overstortmeting het debiet ter hoogte van een stuw worden bepaald, anderzijds kan door monitoring van de stroomsnelheid en het daarbij optredende waterpeil een verband worden gezocht tussen waterpeil, stroomsnelheid en debiet. De monitoring van deze stroomsnelheid gebeurt vandaag via akoestische meetapparaten, bijvoorbeeld de ADM en de ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) meettoestellen. Een ADM bepaalt de watersnelheid in functie van de tijdsverschillen gemeten bij schuin over de waterloop uitgezonden en weerkaatste geluidspulsen. Wegens de installatie- en onderhoudskosten en de vraag naar debieten op steeds meer gestuwde locaties, is het HIC de voorbije twee jaar begon-

Figuur 2: Overzicht toestellen waterstandsmeting



Figuur 3: Overzicht toestellen debietsmeting



nen met het plaatsen van goedkopere en compacte horizontale ADCP-snelheidsmeters. Deze toestellen zenden eveneens geluidspulsen schuin over de waterloop uit, waarbij de watersnelheid weliswaar op een andere wijze bepaald wordt dan bij een ADM, namelijk in functie van de verschuiving van de waargenomen geluidsfrequenties ten opzichte van de uitgezonden frequentie.

Iets meten en tegelijk iets weten

Wanneer een meettoestel op het terrein is geplaatst, moet er nog heel wat gebeuren vooraleer we op bureau deze meetwaarden on-line kunnen bekijken en evalueren. Vooreerst dient het signaal aan de bron zelf uitgelezen te worden door een dataloggersysteem. Deze loggers staan dan via modems en een klassieke telefoonlijn of gsm-verbinding in contact met een centrale verwerkingseenheid. Bij het HIC zorgt deze eenheid ervoor dat nagenoeg alle stations met een frequentie van 15 minuten worden opgebeld om hun meest recente waarden, gestockeerd in de datalogger, door te sturen naar het HIC. Op het ogenblik dat deze waarden bij het HIC toekomen, kunnen deze

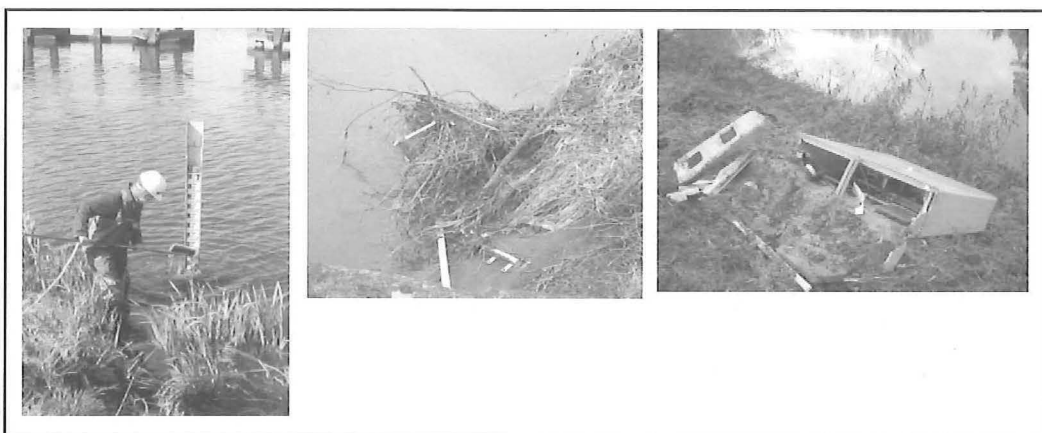
waarden dan ook gepresenteerd worden in grafieken en kan de evolutie gevolgd worden. Tijd voor de evaluatie dan...

Kwaliteitsvol meten....

Het is niet omdat er een meetwaarde op een succesvolle manier kan worden uitgelezen en ook in de centrale verwerkingseenheid toekomt, dat het ook een zinvolle en kwaliteitsvolle waarde is. Hiertoe zijn een aantal essentiële basisstappen nodig. Een eerste taak is een gedegen en regelmatig onderhoud van het meetstation. Ophoping van allerlei materiaal aangevoerd door de waterloop, aanslibbing van de peilschaal, omvergereden en/of geduwde spanningskasten,... zijn maar enkele voorbeelden van dagdagelijkse gebeurtenissen op het HIC meetnet die dan ook een regelmatige controle en, indien nodig, onderhoud vragen (Figuur 4).

Wanneer een peilschaal goed onderhouden wordt, kan ze ook nauwkeuriger worden afgelezen door de hydrograaf of terreinmedewerker tijdens zijn regelmatige controleronde. Deze afge-

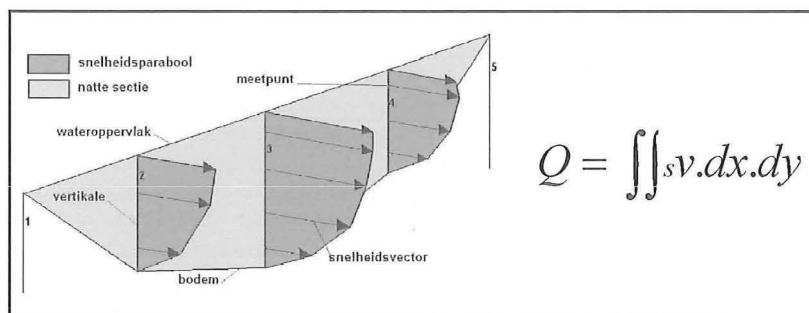
Figuur 4: Motivatie tot een gedegen onderhoud van het HIC meetnet



lezen waarde wordt ogenblikkelijk vergeleken met het signaal van het meettoestel op het terrein en met het signaal dat toekomt in de centrale verwerkingseenheid. Systematische afwijkingen nopen tot bijstelling van het meetapparaat.

Ook tijdens de controleronde, maar vooral tijdens hydrologisch interessante periodes, met name een droge of natte periode, zal de hydrograaf ter hoogte van de meetpost enkele kalibratie- of validatiemetingen uitvoeren, respectievelijk om een nieuw station te iken of een bestaand station te controleren. De ijkning berust op de meting van het debiet bij een bepaalde waterstand volgens de zogenaamde *velocity-area method*. Hierbij wordt de debietwaarde Q berekend als het produkt van de oppervlakte van de natte of stroomvoerende dwarssectie en de gemiddelde stroomsnelheid die volgt uit de gedetailleerde opmeting van de snelheidsverdeling in die sectie aan de hand van de zogenaamde snelheidsparabolen langsheen een voldoende aantal verticalen.

Figuur 5: Integratie van stroomsnelheid over de natte sectie leidt tot een debietsbepaling. Hierbij is v gelijk aan de component volgens de normale van de watersnelheid in een oppervlakteelement $ds = dx.dy$ van de oppervlakte S van de natte sectie



Er zijn verschillende toestellen om de snelheidsparabolen op te meten. Een overzicht wordt gegeven in figuur 6, waar je naast de meer traditionele OTT-molens (links) en de elektromagnetische stroomsnelheidsmeters ook de akoestische meetapparatuur vindt, waarvan de Q-liner (rechts) een uitstekend voorbeeld is van een toestel dat reeds enkele jaren succesvol wordt ingezet. In 2007 zal geïnvesteerd worden in akoestische meetapparatuur die dwars over de waterloop kan worden voortgetrokken, zonder dat het hierbij nodig

is dat nog afzonderlijke verticalen worden opgemeten.

Indien deze ijkingsmetingen de bestaande relaties tussen het debiet en de waterstand (en eventueel de snelheid) in twijfel trekken, dan worden deze relaties herberekend en worden eventueel configuraties in de akoestische apparaten aangepast.

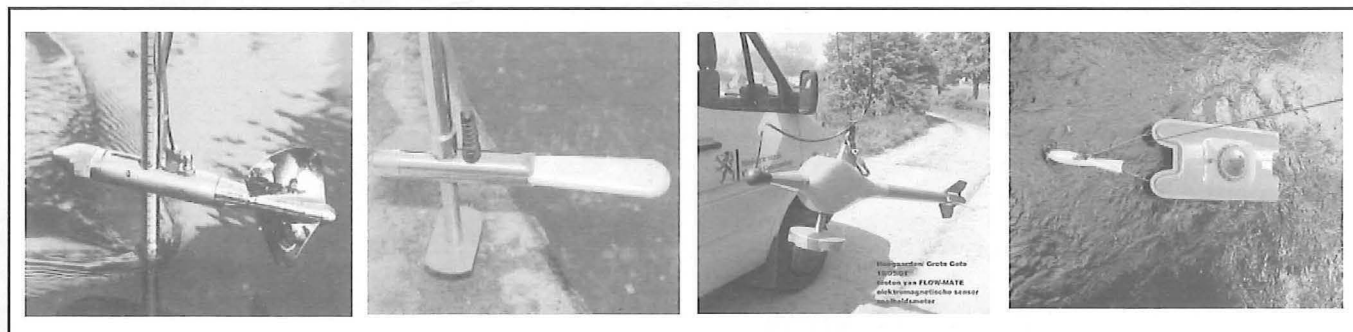
Het HIC voert het ganse proces van kwaliteitsvol meten uit op het HIC meetnet, het meetnet van IVA-VMM, het meetnet van enkele polders en provincies en ook enkele stations van het ABBA-meetnet (EMG).

... en het ook laten weten

Om de kwaliteitsvolle gegevens beschikbaar te maken voor een breed publiek heeft het HIC een gebruiksvriendelijke website (www.lin.vlaanderen.be/awz/waterstanden/hydra) ontwikkeld waar de evolutie van de waterstanden en/of debieten op de voet kan worden gevolgd gedurende het ganse jaar. Hierdoor is dit niet alleen een interessant forum voor de waterbeheerder zelf, die vooral tijdens droge of juist natte periodes op deze website zijn informatie zal zoeken, maar ook voor de burger. Deze laatste zal juist op niet vooraf bepaalde tijdstippen terecht willen kunnen op een forum dat informatie biedt aangaande de toestand van de waterlopen.

De terreingegevens worden naast het dagdagelijks onderhoud van de meetinfrastructuur onderworpen aan een jaarlijkse eindvalidatie van de waterstanden en de debieten en de onderlinge relatie of zog. debietkromme in de betreffende meetlocatie. Dit jaarrapport wordt naar alle relevante klanten verstuurd. Met de nieuwe softwarematige datavalidatie- en verwerkingstechnieken in zicht, zal dit proces van eindvalidatie in de toekomst aanzienlijk kunnen worden versneld, zodat de gevalideerde meetreeksen binnen enkele maanden zullen beschikbaar zijn voor derden.

Figuur 6: Overzicht apparatuur voor de gedetailleerde snelheidsbepaling in een dwarsprofiel

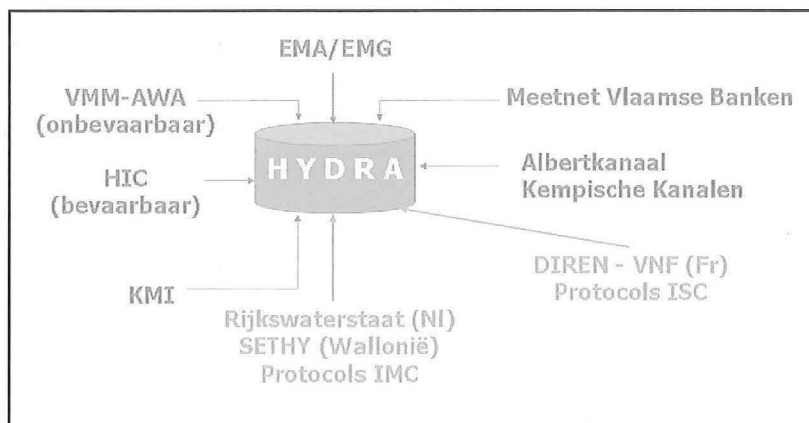


Efficiënt beheren van meetgegevens

Ruwe meetgegevens en gevalideerde tijdreeksen verdienen een gedegen opslagsysteem. Daarom heeft het HIC enkele jaren geleden sterk geïnvesteerd in de HYDRA databank. ...

Deze HYDRA databank is geen op zichzelf staand gegeven maar heeft een link met vele regionale, nationale en ook internationale partners. Dit is voor ons en onze klanten een essentiële kracht, aangezien de hydrologie op zich ook geen rekening houdt met deze grenzen. Figuur 7 geeft aan waar de HYDRA databank zich bevindt in deze nationale en internationale context. Naast de data van het HIC meetnet, getij- en niet getijgebonden bevaarbare waterlopen, bevat de HYDRA databank ook de gegevens van IVA-VMM-AWA, de eigenaar van het meetnet op de onbevaarbare waterlopen, data van het meetnet ABBA van Elektromechanica Antwerpen en Gent (EMA en EMG), gegevens van waterstanden op de kanalen in beheer van NV de Scheepvaart en getijdata van het Meetnet van de Vlaamse Banken (Vlaamse Kust). Gezien het grote internationale karakter van onze stroomgebieden Schelde en Maas is de laatste jaren veel tijd en energie gestoken in de opmaak van protocols binnen de Internationale Commissies voor de realtime uitwisseling van hydrologische gegevens. Met enige trots kunnen we stellen dat het protocol voor de Maas vandaag resulteert in een uurlijkse update van de meest recent beschikbare data vanuit Wallonië, zodat we ook daardoor sneller kunnen anticiperen op nakende wateroverlast. Het protocol voor datauitwisseling in het Scheldestroomgebied werd eind 2006 door alle partners bekrachtigd en wordt nu ook reeds uitgevoerd.

Figuur 7: HYDRA databank in nationale en internationale context



Het HIC heeft met het Duitse "WISKI" (Water Resources Management System KISTERS) een veelbelovend hydrologisch verwerkingspakket aangekocht, om de gegevensvalidatie in steeds meer meetstations modern en snel te kunnen doorvoeren. Dit pakket biedt, naast krachtige grafische hulpmiddelen bij de voorstelling en verbetering van grote tijdsreeksen, ook middelen om de

ijkingsmetingen te controleren, de verbanden tussen de hydrologische parameters te berekenen, de gegevens op maat te downloaden en in overzichtelijke rapporten beschikbaar te stellen.

Een blik vooruit...

De hierboven beschreven ontwikkelingen om klanten en publiek gebruiksvriendelijk en snel toegang te verschaffen tot hydrologische kwaliteitsdata worden in de toekomst verder uitgewerkt.

In het kader van internationale samenwerking wordt de komende jaren het meetnet langs de Gemeenschappelijke Maas afgestemd met de Nederlandse partners in het zogenaamde "Monitoringplan Gemeenschappelijke Maas", uitgevoerd in opdracht van de Vlaams-Nederlandse Bilaterale Maascommissie.

Om in de rapporteringsbehoeften van de Kaderrichtlijn Water te voorzien, en ook in het kader van het Decreet Integraal Waterbeleid zal het meetnet verder worden uitgebreid, dit in nauw overleg met de betrokken beheerders.

Aangezien ook de techniek van datacommunicatie niet stil staat, zal binnenkort ook de data-overdracht via gprs-communicatie uitvoerig worden getest.

Conclusies

Zoals u wellicht zal gemerkt hebben is het opzetten van een gedegen en kwaliteitsvol meetnet geen sinecure. Met de jarenlange ervaring en met de hulp van vele mensen en middelen staan we de dag van vandaag garant voor kwaliteit hoogstaande hydrologische metingen. Het ligt dan ook in onze bedoeling deze informatie blijvend ter beschikking te stellen van onder andere waterbeheerders, regionale en lokale overheden en burgers.

Referenties

HIC 2005. Debietmeten bij het Hydrologisch Informatiecentrum – Technische nota. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap - Departement Mobiliteit en Openbare Werken - Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium.

H. Vereecken,
E. Cornet,
K. Van Eerdenbruch,
F. Mostaert

Waterbouwkundig Laboratorium,
Berchemlei 115,
2140 Borgerhout
Tel. 03/224.60.35,
fax. 03/224.60.36,
hans.vereecken@mow.vlaanderen.be

Het operationeel oppervlakte- watermeetnet voor het lokale en het bekkengerichte water- beheer in Vlaanderen

1. Een 'integraal' en operationeel meet- net

De afdeling Water van de VMM staat in voor het operationeel waterbeheer rond de onbevaarbare waterlopen. De operationele monitoring van het oppervlaktewater via verschillende hydrologische meetnetten is daarvan een onlosmakelijk onderdeel. De hydrologische meetnetten van de afdeling Water volgen continu en on-line de waterpeilen en debieten op in de onbevaarbare waterlopen én de verschillende hydrologische en klimatologische gegevens die daar invloed op uitoefenen. In eerste instantie omvat dit de neerslagmetingen (pluviografen) en de meteo-stations. Essentieel zijn natuurlijk de limnigrafische meetposten. Sinds decennia worden peilen en debieten gemeten. Vroeger was de rol van dit meetnet voornamelijk 'archiverend', en werden de gegevens, na validatie gehanteerd voor ontwerp en wetenschappelijk onderzoek 'a posteriori'. Steeds meer evolueert het meetnet, mede dankzij de opkomst van moderne technologieën (PC, internet) tot een belangrijk onderdeel van de on-line 'voorspellende', 'waarschuwend' en 'sturende' waterbeheersystemen. Deze overgang is momenteel volop aan de gang.

Daarnaast meet de VMM - afdeling Water ook de toestand van de regelconstructies die ze in beheer heeft. Dit gaat van klepstanden van stuwten over pompgegevens van gemalen tot vulpeilen van overloopgebieden. Ook de functie van deze gegevens, die vroeger puur werden gebruikt voor lokale regeling van de constructies, verandert snel naar 'waarschuwend' en 'sturend' op bekkenniveau. Uiteindelijk is ook het sedimentmeetnet op de onbevaarbare waterlopen een belangrijk onderdeel van het operationele meetnet van de VMM - afdeling Water. Dit pionierswerk van meetstations, gestart in de meest erosiegevoelige gebieden in Vlaanderen, wil een gefundeerde basis leggen voor een efficiënt erosie-, sedimentatie- en slibruimingsbeheer.

Operationeel waterbeheer houdt onder meer in dat overstromingen tijdig voorspeld worden en hulpdiensten en burgers tijdig vooraf gewaarschuwd kunnen worden. Omdat hier zeer alert moet gereageerd worden vergt dit een verdere ontwikkeling en uitbreiding van de hydrologische meetnetten, het uitrusten van de meetposten met specifieke apparatuur voor het on-line doorsturen van de meetgegevens en het continu bewaken van de goede werking van de meetsystemen en van de dataverzameling.

2. Pluviografie: van pluviometer naar be- trouwbare pluviograaf

Waar het pluviografisch meetnet van de afdeling Water vroeger enkel bestond uit kantelbakpluviografen beschikt de afdeling Water momenteel over een netwerk van 24 kwaliteitsvolle pluviografen (daarnaast is er nog een netwerk van klassieke kantelbakpluviografen). Hun opstelling is verspreid over Vlaanderen en bedekt alle stroombekkens.

Deze referentietoestellen meten permanent met een hoge meetresolutie (1 minuut) en een hoge bedrijfszekerheid. Dergelijke toestellen zijn gebaseerd op het wegingprincipe, meten met een hoge resolutie en kunnen niet verstoppelen. Windeffecten en pulsen zoals van invallende bladeren ed. worden met behulp van een softwarematig filtermechanisme gecompenseerd.

Nauwkeurige en ogenblikkelijke (real-time) neerslagdata vormen de basis voor hydrologische analyses en ondersteunen de beslissingen die moeten genomen worden bij het operationele waterbeheer. Om deze taken optimaal te kunnen uitvoeren zal de afdeling Water het netwerk aan betrouwbare referentietoestellen uitbreiden naar een totaal van 4 à 5 toestellen per bekken.

3. Hydrometeorologie

De afdeling Water heeft een aantal meteorologische meetstations operationeel - verspreid over het grondgebied Vlaanderen.

De nauwkeurige (en real-time) meteorologische data staan ten dienste van het operationele waterbeheer. Deze gegevens (windrichting, windsnelheid, grond- en luchttemperatuur) dienen als basis voor hydrologische analyses en voor het aanleveren van on-line meetgegevens ter ondersteuning van het operationeel waterbeheer. Essentieel hierbij zijn de metingen van de verdamping. Samen met de neerslag vormt de verdamping (evapotranspiratie) een essentieel element om een gebiedsgerichte waterbalans op te maken. De afd. Water bepaalt in real time de latente warmteflux (potentiële evapotranspiratie) voor een aantal locaties verspreid over Vlaanderen. In 2006 start de afd. Water tevens met een continu meetnet van actuele verdampingmeetposten.

4. Peil- en debietmeting: het historisch meetnet & uitdagingen voor de toekomst

Sinds enkele decennia worden er peilen en debieten gemeten op de onbevaarbare waterlopen. Waar oorspronkelijk het KMI startte met het plaatsen van limnigrafen werd bij de federalisering van de Belgische staat die bevoegdheid overgeheveld naar het Vlaamse Gewest. Achtereenvolgens stonden de RUG & K.U.Leuven (1984-1995) en het Waterbouwkundig Laboratorium (1996-2006) in voor het onderhoud van dit meetnet. Momenteel worden op 220 plaatsen op onbevaarbare waterlopen peilen en/of debieten gemeten, gespreid over heel Vlaanderen. Er worden stroomgebieden bemeten van 200 tot 200 000 ha. Op verschillende (historische) lokaties gebeurt dit nog steeds met behulp van vlotterlimnigrafen. Typische mankementen van deze limnigrafen zijn de haperende vlotters en dichtgeslibde vlotterbuizen, waardoor regelmatig onderhoud en een nauwkeurige validatie essentieel is. De toepasbaarheid van deze metingen in een on-line waarschuwingssysteem is dan ook beperkt. Sinds een tiental jaar wordt het meetnet geautomatiseerd. In eerste instantie werden verschillende ultrasone hoogtemeters geplaatst, sinds kort zijn accurate radar-hoogtesensoren het neusje van de zalm. Ook voor het bepalen van de klassieke debiet-peil-verbanden wordt steeds vaker gebruik gemaakt van ultrasone snelheidssensoren. Het huidige limnigrafisch meetnet ziet zich geconfronteerd met enkele problemen:

- weinig metingen in de poldergebieden
- door de verbeterende waterkwaliteit wordt het debiet-peil-verband zeer vaak waardeloos i.g.v. plantengroei
- door de veranderende functionaliteit (waarschuwen) komt de nadruk sterker te liggen op meetplaatsen met relevante 'waarschuwwaarde'. Dit vereist een uitbreiding van het meetnet.

Het eerste probleem werd recent aangepakt met een uitbreiding van het meetnet in de poldergebieden. Verschillende nieuwe stations werden ingericht. Voor het probleem van plantengroei werd nog geen sluitende oplossing gevonden. Dit blijft een aandachtspunt de komende jaren. De uitbreiding in functie van waarschuwing en voorspelling houdt gelijke tred met de ontwikkeling van voorspellingsmodellen voor de desbetreffende bekkens.

5. Metingen op kunstwerken (klepmetingen, pompuren, ...)

De afdeling Water beschikt over een enorm patrimonium van waterbouwkundige kunstwerken op haar waterlopen. Dat bestaat uit stuwen, verdeelwerken en pompstations. Deze kunstwerken worden deels ter plaatse en deels van op afstand bestuurd in functie van hun toepassing: wateroverlast voorkomen, verdroging beperken, ... Er gebeuren tal van metingen ter hoogte van de kunstwerken (opwaartse en afwaartse waterpeilen, klep- of schuifstand, werking van pompen,

debiet aan pompstations en stuwen, vermogen, ...).

De controle, sturing en opvolging gebeurt aan de hand van deze metingen, en worden doorgaans met een interval van één minuut geregistreerd.

Naast de doeleinden voor het operationele waterbeheer bieden de metingen ter hoogte van de kunstwerken hydrologische informatie. De peil- en debietgegevens vullen de metingen uit het limnimetrische meetnet aan. Daarom investeert de afdeling in het uitrusten van bestaande stuwstations, verdeelwerken en pompstations als permanent peil- en debietmeetstation.

6. Sedimentmetingen

Door het toenemend belang van de slibproblematiek is de afdeling Water in 1999 met de uitbouw van een sedimentmeetnet in Vlaanderen begonnen. Met dit sedimentmeetnet wenst men meer zicht te krijgen op de grootte van het sedimenttransport, op het aandeel van het geërodeerd materiaal dat de waterlopen bereikt en op de processen die hierin een rol spelen. In het hellend gebied van Oost-Vlaanderen zijn acht meetstations uitgerust om naast hydrologische en meteorologische metingen eveneens continue sedimentmetingen uit te voeren. De stroomgebiedsoppervlakten van de meetstations variëren tussen 200 en 5000 ha. Vijf van deze meetstations zijn gesitueerd in het stroomgebied van de Maarkebeek, 1 in het stroomgebied van de Zwalm en 2 aan de in- en uitlaat van een wachtbekken in het stroomgebied van de Plankbeek (Fig. 1). De infrastructuur van een meetstation bestaat uit een meetgoot of vaste sectie, een elektrische installatie, een datalogger, een monsternametoestel, een hoogtemeter, een snelheidsmeter en een turbiditeitsmeter. De turbiditeitsmeters meten de relatieve helderheid van de waterloop. Het verband tussen de turbiditeit en de sedimentconcentratie van een vloeistof is niet éénduidig, maar afhankelijk van parameters zoals de korrelgrootteverdeling van het sediment, kleur en zoutgehalte van het water en kleur en vorm van het sediment. Daarom is een calibratie nodig van elke turbiditeitsmeter voor een bepaalde waterloop, die het verband tussen de sedimentconcentratie en turbiditeit voor een bepaalde turbiditeitsmeter voor die waterloop vastlegt. De sedimentconcentraties worden bepaald met behulp van geautomatiseerde staalnames in functie van de waterhoogte. Telkens de waterhoogte een bepaald grensniveau overschrijdt (of onderschrijdt), wordt een watersaal genomen.

Voor de meeste stations van Oost-Vlaanderen zijn volledige tijdreeksen van sedimentvrachten beschikbaar vanaf 2003. In Fig. 2 worden de jaarlijkse sedimentvrachten voor de voorbije 3 jaar weergegeven voor 6 van de 8 meetstations. Voor de stations zonder wachtbekken in het stroomgebied werden tijdens de periode 2003-2005 jaarlijks gemiddeld tussen 1,5 en 2,8 ton/ha door de

Fig 1. Locaties van de sedimentstations met respectievelijke stroomgebieden in zuidoost-Vlaanderen

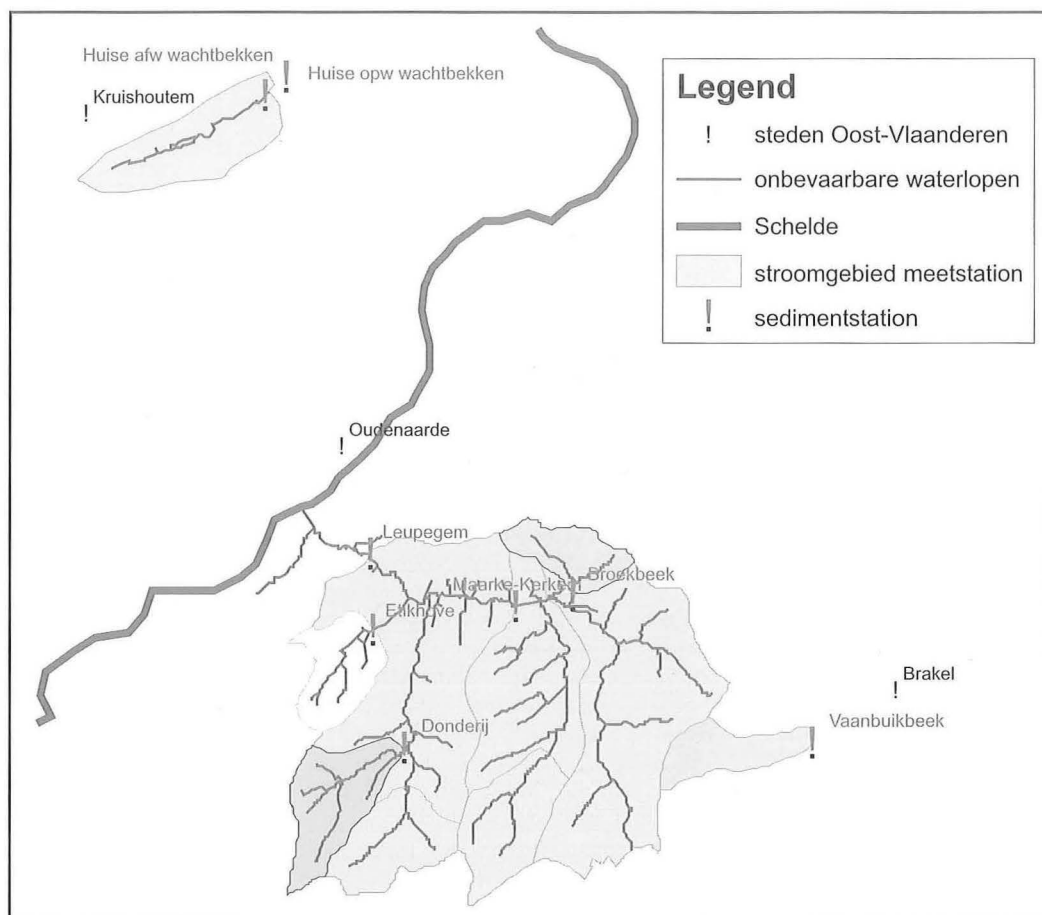
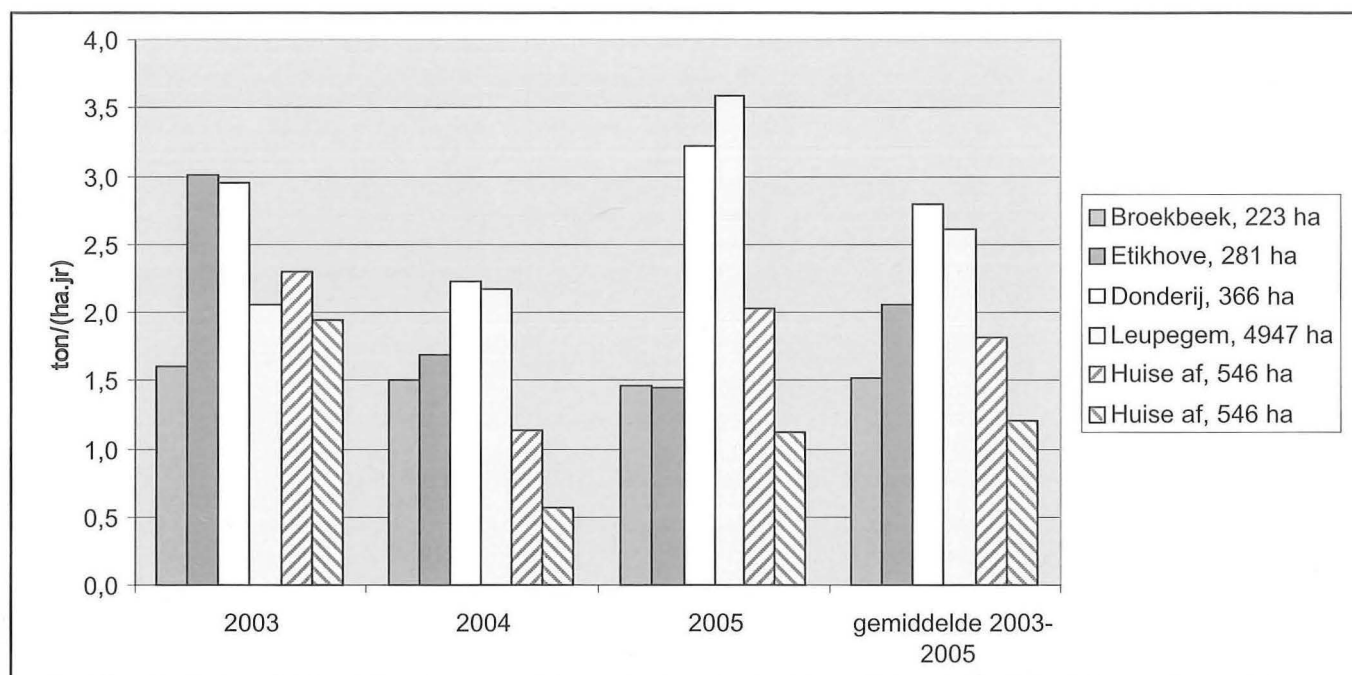


Fig 2. Jaarlijkse sedimentvrachten voor de voorbije 3 jaar voor 6 van de 8 meetstations in het hellend gebied van Oost-Vlaanderen



bemeten waterlopen getransporteerd. Opvallend hierbij is de gelijkenis in sedimenttransportwaarden voor verschillende stroomgebiedsgroottes. De zomerstormen blijken daarbij zeer sedimentproductief: afhankelijk van het stroomgebied gebeurde 42% tot 70% van het jaarlijks

sedimenttransport van 2005 tijdens 2 zomer-onweders (4 juli & 19 augustus 2005). Afwaarts het wachtbekken ('Huisse af', Fig 2) wordt gemiddeld 30% minder sedimenttransport gemeten dan opwaarts het wachtbekken.

Ook de korrelgrootteverdeling van het sediment wordt onderzocht, daar dit een belangrijke parameter is bij de dimensionering van slibvangen ed. Het sediment kleiner dan $16\ \mu\text{m}$, d.i. de moeilijk afslibbare fractie, vormt de belangrijkste fractie van de sedimentvrucht. De korrelgrootteverdeling blijkt daarbij grover te worden naargelang de sedimentconcentratie stijgt.

In 2005 is het sedimentmeetnet uitgebreid met een tiental sedimentstations in het zuidoostelijk Demerbekken, met stroomgebiedgroottes van 170 tot ruim 10 000 ha. Naast absolute waarden van sedimenttransporten voor dit erosiegevoelig gebied, zal ook de vergelijking van sedimenttransportwaarden tussen verschillende hydrologische regio's binnen Vlaanderen interessante informatie opleveren. De afdeling Water wenst dit sedimentmeetnet binnen afzienbare tijd uit te breiden over geheel sedimentgevoelig Vlaanderen.

8. Ter beschikkingstelling van de gegevens

Het huidige aantal meetposten (medio 2006) is aangegroeid tot 327 meetlocaties. Op elke locatie zorgen meettoestellen, dataloggers en telecommunicatie-apparatuur voor de continue registratie, opslag en doorsturen van de meet-

gegevens naar de centrale Hydronet databank. Tegen eind 2006 zullen er 384 meetstations operationeel zijn. Aangezien per meetstation vaak meerdere parameters worden gemeten, bedraagt het aantal gegenereerde tijdreeksen 1.229. Alle meetposten registreren continu. Afhankelijk van het type meetnet wordt een meetwaarde opgeslagen met een interval van 1 tot 15 minuten. Dit impliceert de nood tot het opvolgen en beheren van een gigantische hoeveelheid data. De toepassing Hydronet (<http://www.hydronet.be>) geeft toegang tot alle actuele en historische meetgegevens geregistreerd door de verschillende oppervlaktewatermeetnetten voor het operationeel waterbeheer van de afdeling Water - IVA-VMM. Via de webtoepassing wordt ook gewaarschuwd voor kritische waterpeilen met gevaar voor overstromingen of lage waterstanden.

*P. Cabus,
W. Defloor,
F. Raymaekers,
M. Voet en
T. Van Hoestenbergh*

*VMM, Afdeling Water,
Koning Albert-II laan 20, 1000 Brussel*

Neerslaginvoer voor hydrologische en hydraulische modellen

Neerslag is de drijvende kracht achter heel wat hydraulische problemen. Daarom is een grondige kennis over de neerslag van groot belang. De grote variabiliteit van de neerslag in tijd en ruimte maakt het niet eenvoudig om een goede keuze te maken van de neerslaginvoer voor ontwerpberekeningen en modellering. Een slechte keuze van de neerslaginvoer kan leiden tot verkeerde inschattingen van de risico's met soms verstrekkende gevolgen.

In dit artikel wordt ingegaan op volgende aspecten :

- het belang van een nauwkeurige neerslagmeting
- de keuze van de neerslaginvoer voor verschillende toepassingen en watersystemen
- de statistische verwerking van neerslagreeksen
- de invloed van de ruimtelijke spreiding van de neerslag

Deze bijdrage geeft een overzicht van het onderzoek hieromtrent van de laatste 15 jaren aan het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven.

Inleiding

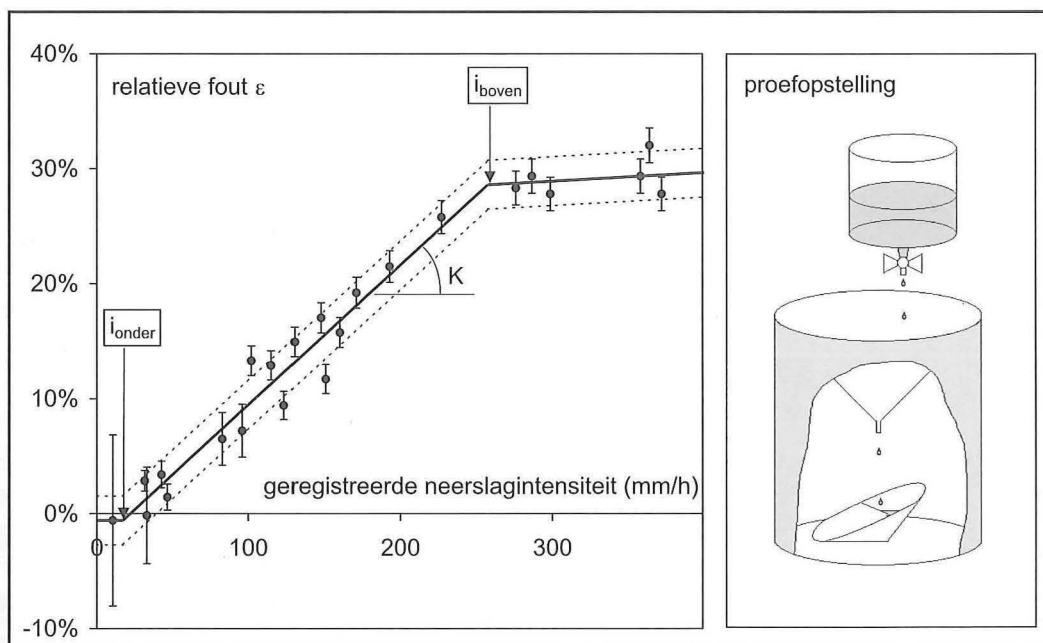
Neerslag is de drijvende kracht achter heel wat hydraulische problemen. Daarom is een grondige kennis over de neerslag van groot belang. De grote variabiliteit van de neerslag in tijd en ruimte maakt het niet eenvoudig om een goede keuze te maken van de neerslaginvoer voor ontwerpberekeningen en modellering. Een slechte keuze van de neerslaginvoer kan leiden tot verkeerde inschattingen van de risico's met soms verstrekkende gevolgen.

Aan het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven werd de laatste 15 jaar de Vlaamse neerslag grondig onder de loep genomen in al zijn facetten. Deze bijdrage geeft een overzicht van dit onderzoek.

Neerslagmeting

Meestal wordt gebruik gemaakt van puntneerslagmetingen opgemeten met pluviografen. Uit onderzoek blijkt dat een goede kalibratie nodig is om de resultaten van deze pluviografen betrouwbaar te maken. Zowel kantelbakpluviografen (tipping bucket) als sifonpluviografen (sifoning gauge) geven systematische onderschattingen van de neerslag bij hoge intensiteiten (figuur 1) [Luyckx & Berlamont, 2001, 2002; Vaes & Berlamont, 2004a]. Deze onderschatting kan ruw worden ingeschat op basis van de pluviograafkarakteristieken of meer nauwkeurig aan de hand van een dynamische calibratie. Dit zijn weinig tijdrovende kalibratietechnieken die de neerslagmeting sterk kunnen verbeteren.

Figuur 1: Voorbeeld van een dynamische kalibratiecurve en een schets van een meetproefopstelling [Luyckx & Berlamont, 2001].



Recent worden ook radarbeelden gebruikt voor de inschatting van de neerslag. In ruimtelijke resolutie geven neerslagradarbeelden een grote meerwaarde, maar de resolutie in tijd en nauwkeurigheid in locatie en intensiteit is nog beperkt [Einfalt et al., 2004]. Er is verder onderzoek nodig naar de bruikbaarheid en implementatie van neerslagradargegevens voor hydrologische toepassingen.

Op het eind van de jaren '90 werd de digitalisatie vervolledigd van een neerslagtijdreeks van 100 jaar (1898-1997) opgemeten met eenzelfde pluviograaf van het KMI te Ukkel. Op deze unieke tijdreeks werd een trendanalyse uitgevoerd, voor een brede variatie aan neerslag van kortstondige buien (10 minuten) tot seizoensneerslag (per 3 maanden). Uit deze analyse bleek een licht dalende tendens voor de kortstondige (zomer)-neerslag en een licht stijgende tendens voor de meer langdurige (winter)neerslag. Er werd evenwel geen significante trend vastgesteld [Vaes & Berlamont, 2000]. Deze conclusies zijn recent bevestigd in de analyse van Blanckaert & Willems [2006] voor de uitgebreide neerslagreeks te Ukkel tot en met 2004. Momenteel loopt er aan het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven een onderzoek waarbij de toekomstige neerslag wordt geanalyseerd door het neerschalen van toekomstscenarië's op basis van klimaatmodellen [Willems et al., 2007].

Neerslag in functie van de toepassing

Er worden twee categorieën van toepassingen onderscheiden waarbij het vereiste type neerslag verschillend is:

- kalibratie / verificatie voor historische gebeurtenissen: neerslag vereist op de betreffende plaats en op het betreffende tijdstip
- ontwerptoepassingen: statistisch representatieve neerslag vereist

Deze twee soorten toepassingen hebben dus specifieke vereisten m.b.t. de benodigde neerslag. Hierbij wordt verondersteld dat de neerslag dient om modellen te voeden, omdat de meeste afwateringssysteem vandaag de dag te complex zijn om nog met enige nauwkeurigheid via een handberekening uit te rekenen en omdat de toegankelijkheid tot modellen vandaag de dag goed is ingeburgerd.

In theorie gebruikt men voor ontwerptoepassingen best continue simulaties met lange-termijn-tijdreeksen (minimum 30 jaren), maar omwille van de beperking in rekentijd, is dit vaak niet haalbaar bij complexe hydraulische berekeningen. Daarom wordt de neerslag vaak (statistisch) verwerkt en wordt er met in duur beperkte (representatieve) neerslag gerekend. Deze voorverwerking van de neerslag leidt tot minder goede resultaten wanneer de te modelleren systemen niet-lineair zijn. Immers de kans op voorkomen van een gesimuleerd effect is niet noodzakelijk gelijk aan de kans op voorkomen van de neerslag die dit effect veroorzaakt. In deze gevallen bepaalt het gedrag

van het gemodelleerde afwateringssysteem dus mee de nauwkeurigheid van het resultaat. Een goede keuze van het soort te gebruiken neerslag in functie van de toepassing en het te modelleren watersysteem is dan ook van cruciaal belang [Vaes et al., 2001].

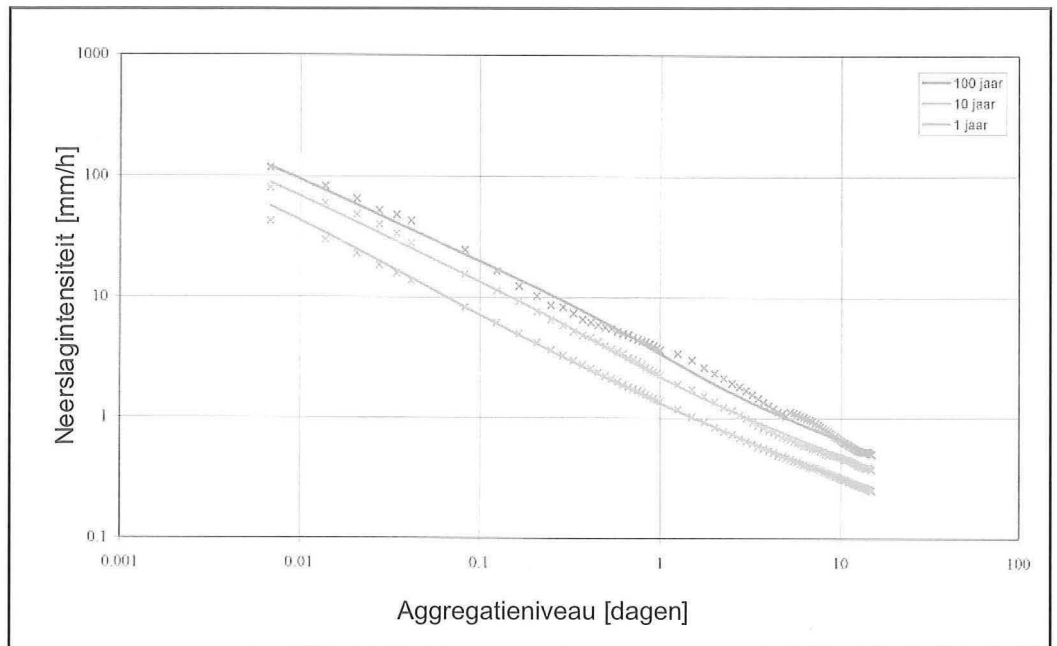
Een overzicht volgt hieronder:

- Voor rioolmodellen:
 - o Ontwerpberekeningen: Omdat bij de extreme buien waarvoor ontwerpberekeningen worden gemaakt, de overstorten in werking treden, wordt het systeemgedrag bij benadering lineair en kunnen zogenaamde ontwerpbuien (vb. composietbuien, zie verder) met voldoende nauwkeurigheid worden toegepast. Een bijkomende verbetering van de nauwkeurigheid kan worden bekomen door het gebruik van geselecteerde korte reeksen [Vaes, 1999, 2000].
 - o Berekening overstortemissies: Door de niet-lineariteit van het systeem geeft het gebruik van continue lange-termijn-simulaties met vereenvoudigde modellen veel nauwkeurigere resultaten dan het gebruik van ontwerpbuien [Vaes, 1999, 2000].
 - o Berekening van bronmaatregelen: door de sterke niet-lineariteit van het systeem zijn continue lange-termijn-simulaties onontbeerlijk [Vaes & Berlamont, 2004b; Vaes et al., 2004a].
- Voor waterloopmodellen wordt een onderscheid gemaakt tussen de hydrologische deelmodellen (modellering van neerslagafstroming) en de hydrodynamische deelmodellen (modellering rivierstroming) [Willems et al., 2000]:
 - o Hydrologische deelmodellen: Door de sterke tijdsvariatie (ook op lange-termijn) van het verzadigingsgehalte van de ondergrond en de invloed van dit gehalte op de neerslagafstroming, zijn lange-termijn-simulaties onontbeerlijk.
 - o Hydrodynamische deelmodellen: Door de korte concentratietijd langs waterlopen kunnen ontwerphydrogrammen gebruikt worden (vb. composiethydrogrammen; afgeleid via statistische naverwerking van de historische tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten [Vaes et al., 2002a]). Ook kan worden gewerkt met geselecteerde hydrogrammen uit de historische tijdreeks.

Statistische verwerking van neerslagtijdreeksen

Voor de statistische voorverwerking van neerslagtijdreeksen via Intensiteit/Duur/Frequentie-relaties (IDF) werd een vernieuwde methodiek uitgewerkt gebaseerd op de selectie van onafhankelijke neerslagextremen (Peak Over Threshold selectiemethode) en een geavanceerde extreme-waarden-analysetechniek [Vaes et al., 1994; Willems, 2000a]. In figuur 2 worden de IDF-relaties weergegeven voor een aantal terugkeerperioden. Afzon-

Figuur 2 : IDF-relaties voor Ukkel [Willems, 2000].



derlijke en gecombineerde IDF-verbanden werden opgesteld voor zomer- en winterperioden en voor buien van convectieve en frontale oorsprong [Willems, 2000b]. Dit onderscheid is belangrijk omdat er een duidelijk verschil is tussen de karakteristieken van convectieve zomerbuien (lokale onweders) en frontale winterneerslag (langduriger en uitgestrekter) en dit een significant verschil geeft voor hydrologische berekeningen.

Op basis van deze IDF-relaties werd een methodiek uitgewerkt voor het opstellen van ontwerpbuien, de zogenaamde composietbuien [Vaes & Berlamont, 1996; Vaes, 1999]. Deze methodiek werd later uitgebreid naar de analyse van continue lange tijdreeksen van afstromingsdebieten van hydrologische modellen om zo tot composiethydrogrammen voor waterloopmodellering te komen [Vaes et al., 2002a].

Een andere mogelijkheid om de neerslaginvoer te beperken in de tijd bestaat uit het selecteren van representatieve gebeurtenissen. Hierbij moeten alle statistische relevante gebeurtenissen worden meegenomen en worden de onbelangrijke tussenperiodes weggelaten. Dit betekent ook dat er rekening wordt gehouden met de karakteristieken van het watersysteem waarvoor de neerslaginvoer wordt gebruikt en van het type toepassing; het systeemgedrag bepaalt immers mee welke gebeurtenissen statistisch relevant zijn voor het te simuleren effect. De methodiek werd uitgewerkt voor de selectie van neerslaginvoer gebeurtenissen op basis van IDF-relaties voor ontwerpberekeningen bij riolerings [Vaes, 1999, 2000], op basis van een conceptueel rioolmodel voor emissieberekeningen aan riooloverstorten [Vaes, 1999, 2000] en op basis van QDF-relaties (Debiet/Duur/Frequentie-relaties) voor invoerhydrogrammen bij waterloopmodellering [Vaes et al., 2002a].

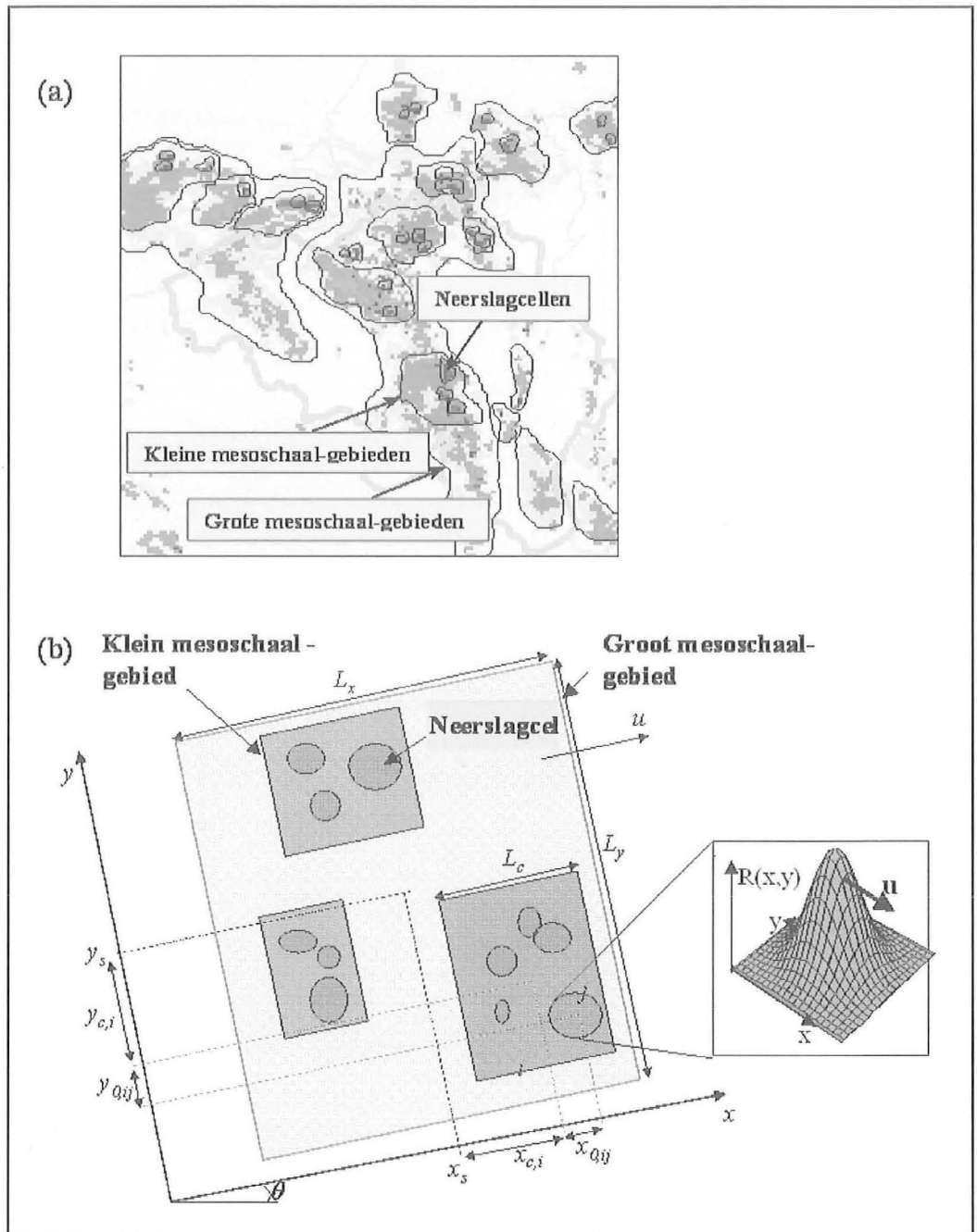
Ruimtelijke variabiliteit van de neerslag

Het correct inrekenen van de ruimtelijke spreiding van de neerslag is een belangrijk probleem bij hydrologische berekeningen. Daarom werd er onderzoek uitgevoerd naar de ruimtelijke variatie van de neerslag en de representativiteit van puntneerslag voor hydrologische en hydraulische berekeningen [Luyckx et al., 1998; Willems, 2001]. Op basis van de geïnventariseerde karakteristieken van de ruimtelijk variërende neerslag (bewegingsrichting en -snelheid) werd een methodiek uitgewerkt om bij het gebruik van ontwerpbuien met de dynamiek van de neerslag rekening te houden (bewegende composietbuien voor rioleringsberekeningen) [Vaes et al., 2002b]. Deze dynamiek blijkt de simulatieresultaten van watersysteemmodellen in grote mate te beïnvloeden, wanneer de hoofdafstromingsrichting van het afwateringssysteem gelijk is aan de dominante windrichting en des te meer naargelang de neerslag trager over het gebied trekt.

Omdat er een groot gebrek is aan voldoende grondmetingen over ruimtelijk variërende neerslag, werd een stochastische ruimtelijke neerslaggenerator opgesteld op basis van een analyse van de ruimtelijke karakteristieken van regenbuien, gebruik makend van de meetgegevens van dichte pluviograafnetwerken en van radarbeelden (figuur 3) [Willems, 2001; Willems et al., 2003]. Deze neerslaggenerator laat toe om continue langdurige neerslagvelden te genereren die statistisch relevant zijn en waarmee verder onderzoek naar de ruimtelijke spreiding van de neerslag kan worden uitgevoerd.

Via simulaties met deze ruimtelijke neerslaggenerator werden ruimtelijke correctiefactoren bepaald die toelaten om de systematische fout in de neerslaginvoer door het gebruik van puntneerslag ten opzichte van de werkelijke ruimtelijk geaggregeerde neerslag over het studiegebied te

Figuur 3 : Karakterisatie van de ruimtelijke neerslag en het afgeleide neerslagmodel [Willems et al., 2003].



eliminieren (figuur 4) [Vaes et al., 2004b]. Deze ruimtelijke correctiefactoren zijn heel wat kleiner dan de correctie op basis van de Fröhling regel die in het verleden vaak werd toegepast [Vaes et al., 2000, 2004b].

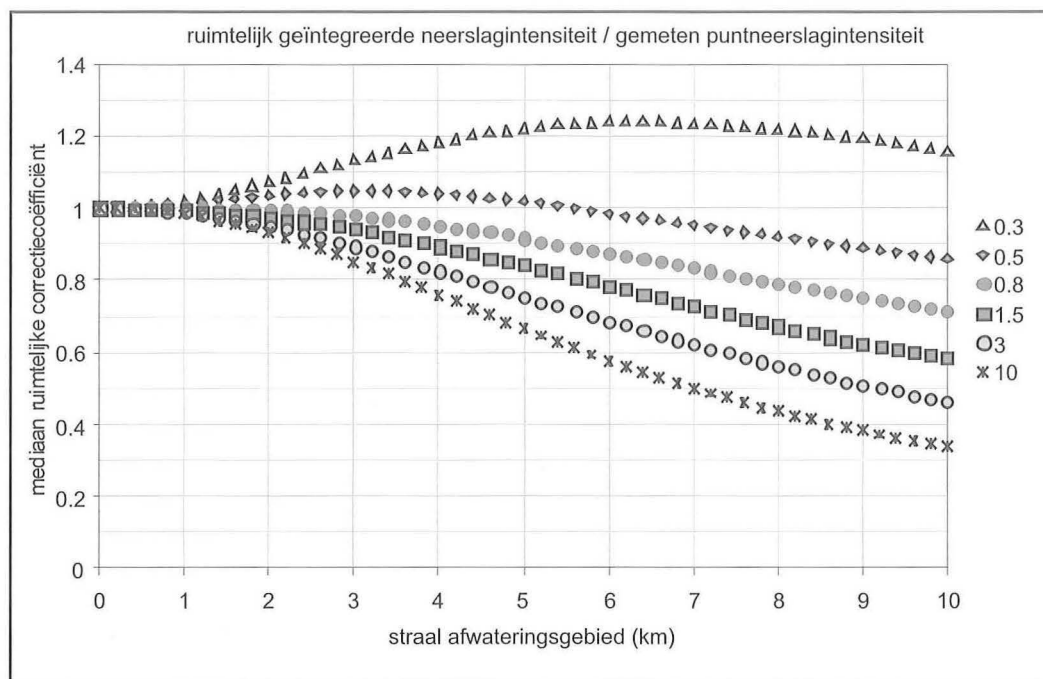
Conclusies

Bij hydrologische en hydraulische berekeningen bepaalt de toepassing en het type te modelleren watersysteem in grote mate de optimale keuze van de neerslaginvoer. De afweging moet echter verder gaan dan enkel m.b.t. de neerslaginvoer. Meestal gaat de keuze van het type model en van de neerslaginvoer hand in hand. De optimale combinatie kan bijvoorbeeld een vereenvoudigd

model zijn met continue lange-termijn-simulaties, omdat de lange-termijn-simulatie een grote meerwaarde betekent boven een gedetailleerd model. Een slechte keuze van de neerslaginvoer kan leiden tot verkeerde inschattingen van de risico's met soms verstrekende gevolgen.

Voor de toepassing van rioleringsberekeningen werd een overzicht m.b.t. de neerslagdata en de neerslaginvoer neergeschreven in de "Toelichting bij de code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringen" (www.mina.be/code_goede_praktijk.html) [Vaes et al., 2004a]. Voor de toepassing van waterloopberekeningen werd een overzicht gegeven in de "Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen"

Figuur 4 : Ruimtelijke correctiecoëfficiënten voor 10 minuten neerslag [Vaes et al., 2004b].



[Willems et al., 2000] en in het rapport bij het "Ruimtelijk neerslagmodel Vlaanderen" [Willems et al., 2003].
Meer informatie is ook te vinden op www.kuleuven.be/hydr/urban.html.

Referenties

Blancaert J. & Willems P. (2006). Opstellen van een methode voor het inrekenen van de klimaatverandering in de compositiehydrogrammethode – Analyse trends en cycli, Rapport MOD 706/10-2 van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, door K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica en IMDC.

Einfalt Th., Arnbjerg-Nielsen K., Golz C., Jensen N.-E., Quirnbach M., Vaes G. & Vieux B. (2004). Towards a Roadmap for Use of Radar Rainfall Data in Urban Drainage. *Journal of Hydrology*, volume 299, nr. 3-4.

Luyckx G. & Berlamont J. (2001). Vereenvoudigde methode om neerslagmetingen van kantelbakpluviografen te corrigeren. *Rioleringswetenschap*, nr. 4.

Luyckx G. & Berlamont J. (2002). Accuracy of siphoning rain gauges. 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, VSA, september 2002.

Luyckx G., Willems P. & Berlamont J. (1998). Influence of the spatial variability of rainfall on sewer system design. *Hydrology in a changing environment*, ed. H. Wheeler & C. Kirby, John Wiley & Sons, volume III.

Vaes G. (1999). The influence of rainfall and model simplification on combined sewer system design. Doctoraats thesis, Faculteit Ingenieurswetenschappen K.U.Leuven, www.hydroscan.be/hydrofront.cgi?s_id=20.

Vaes G. (2000). De invloed van neerslag en modelvereenvoudiging op het ontwerp van gemengde rioleringen. @WEL - Water nr. 3.

Vaes G. & Berlamont J. (1996). Composietbuilen als neerslaginvoer voor rioleringsberekeningen. *Water*, nr. 88.

Vaes G. & Berlamont J. (2000). Is er een trend in 100 jaar neerslag te Ukkel? @WEL - Water nr. 5, juni 2000.

Vaes G. & Berlamont J. (2004a). The use of standard tipping bucket rain gauges to measure extreme rainfall intensities. 6th International Conference on Urban Drainage Modelling, Dresden, Duitsland, september 2004.

Vaes G. & Berlamont J. (2004b). Het ontwerp van bronmaatregelen gebaseerd op continue lange-termijn-simulaties. *Water*, nr. 13, januari/februari 2004.

Vaes G., Willems P. & Berlamont J. (1994). Een kritische kijk op IDF-relaties. *Water*, nr. 79.

Vaes G., Luyckx G. & Berlamont J. (2000). Nieuwe tendensen in het rioleringsontwerp. *Water* nr. 7, oktober 2000.

Vaes G., Willems P. & Berlamont J. (2001). Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water*, volume 3, nr. 1-2.

Vaes G., Willems P. & Berlamont J. (2002a). Selectie en compositie van representatieve hydrogrammen voor riviermodellering. Water, nr. 1, mei 2002.

Vaes G., Willems P. & Berlamont J. (2002b). Bewegende buien voor het ontwerp van riolen. Rioleringswetenschap en -techniek, volume 2, nr. 6.

Vaes G., Bouteligier R., Luyckx G., Berlamont J. (2004a). Toelichting bij de Code van goede praktijk voor het ontwerp van rioleringen, Rapport door K.U.Leuven - Afdeling Hydraulica in opdracht van de Afdeling Water, www.mina.be/code_goede_praktijk.html.

Vaes G., Willems P. & Berlamont J. (2004b). Ruimtelijke neerslagcorrectiecoëfficiënten voor rioleringsberekeningen. Rioleringswetenschap en -techniek, nr. 15, september/oktober 2004.

Willems P. (2000a). Probabilistic immission modelling of receiving waters. Doctoraatsthesis, Faculteit Ingenieurswetenschappen K.U.Leuven.

Willems P. (2000b). Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types, Journal of Hydrology, vol. 233, 189 - 205

Willems P. (2001). A spatial rainfall generator for small spatial scales, Journal of Hydrology, vol. 252, 126-144

Willems P., Qvick A., Vaes G., Berlamont J., Christiaens K. & Feyen J. (2000). Algemene methodologie voor het modelleren van de water-

afvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen. Rapport door K.U.Leuven in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid.

Willems P., Delbeke L., Qvick A., Vaes G., Berlamont J., Verhoest N., de Troch F., Sas M. & Demarée G. (2003). Ontwikkeling van een operationeel ruimtelijk neerslagmodel voor Vlaanderen. Rapport in opdracht van Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Programma Beleidsgericht Onderzoek.

Willems P., Boukhris O., Berlamont J., Blanckaert J., Van Eerdenbrugh K., Viaene P. (2007). Impact van klimaatverandering op hydrologische extremen - testcase Dender, Water, dit nummer.

Guido Vaes
Projectmanager,
HydroScan NV,
Tiensevest 26/4,
3000 Leuven,
tel 016 24 05 05,
fax 016 24 05 09,
E-mail: Guido.Vaes@hydroscan.be

Patrick Willems
Postdoctoraal onderzoeker FWO-Vlaanderen en
gastdocent K.U.Leuven
Laboratorium voor Hydraulica,
K.U.Leuven,
Kasteelpark Arenberg 40,
3001 Heverlee,
tel 016 32 16 63,
fax 016 32 19 89,
E-mail: Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

Geïntegreerde modellering van hydrologische processen op rivierbekkenschaal

WetSpa (Water and Energy Transport in Soil, Plant and Atmosphere) is een numeriek ruimtelijk verdeeld hydrologisch simulatiemodel om hydrologische processen te voorspellen op bekkenschaal, met behulp van digitale gegevens betreffende topografie, landgebruik, bodemtype, neerslag en potentiële verdamping. Met behulp van dit model werd het voorkomen van overstromingen onderzocht in het bekken van de Alzette, Groothertogdom Luxemburg. In een eerste toepassing werd het effect van landgebruik nagegaan. Er werden drie scenario's onderzocht: urbanisatie, ontbossing en herbebossing. Analyse van de resultaten toont aan dat urbanisatie de piekafvoer kan doen toenemen met 26%, ontbossing met 5% en herbebossing een daling geeft van 3%. Deze resultaten wijzen op het belang van een ruimtelijke ordening in functie van integraal waterbeheer, alhoewel de impact op piekafvoeren misschien kleiner is dan wat tot nu toe verondersteld werd. Een tweede toepassing betreft het effect van natuurherstel van brongebieden. Het blijkt dat de eerste en tweede orde waterlopen in het Alzette-bekken 79% van het stroomgebied ontwateren. In de veronderstelling dat deze waterlopen niet verder beheerd zouden worden, zal door de vegetatie en de afkalving van de oevers de stromingsweerstand en de meandering toenemen wat kan leiden tot een reductie van de piekafvoer in de benedenloop. Het model voorspelt dat de verblijftijd met 5 uur kan toenemen wat aanleiding geeft tot een grotere afvlakking van afvoergolven en tot een meer in de tijd verspreide samenvloeiing van de afvoer van verschillende bovenlopen waardoor de piekafvoer gemiddeld met 14% zal dalen. Een derde toepassing betreft de invloed van klimaatwijzigingen. Hieruit blijkt dat er een belangrijke toename in de neerslag te verwachten is in de winter wat zal resulteren in het bijna verdubbelen van de winterafvoer. Hierdoor zal er ook een sterke toename zijn in overstromingsrisico; de voorspelde maximale piekafvoer in een periode van 100 jaar (1% kans) bedraagt nu ongeveer 60 m³/s, terwijl dit in de toekomst kan oplopen tot 80 m³/s en meer.

1. Inleiding

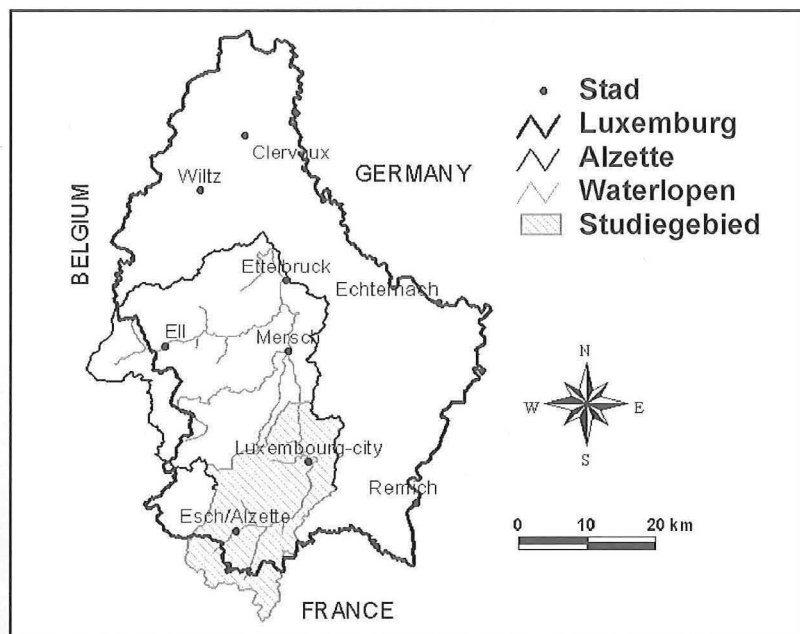
Na de desastreuze overstromingen in Europa in de jaren 1990 werd overal de vraag gesteld in wel mate klimaatverandering en landgebruik de hydrologische cyclus verstoren. In het kader van een Europees onderzoeksprogramma (IRMA-SPONGE), werd in het project FRHYMAP (Flood Risk and Hydrological Mapping), 2000-2001, het voorkomen van overstromingen onderzocht in het bekken van de Alzette, Groothertogdom Luxem-

burg. Door de vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, Vrije Universiteit Brussel, werd hierbij het WetSpa model toegepast om ruimtelijk verdeelde afvoerprocessen te voorspellen onder invloed van landgebruik en klimaat.

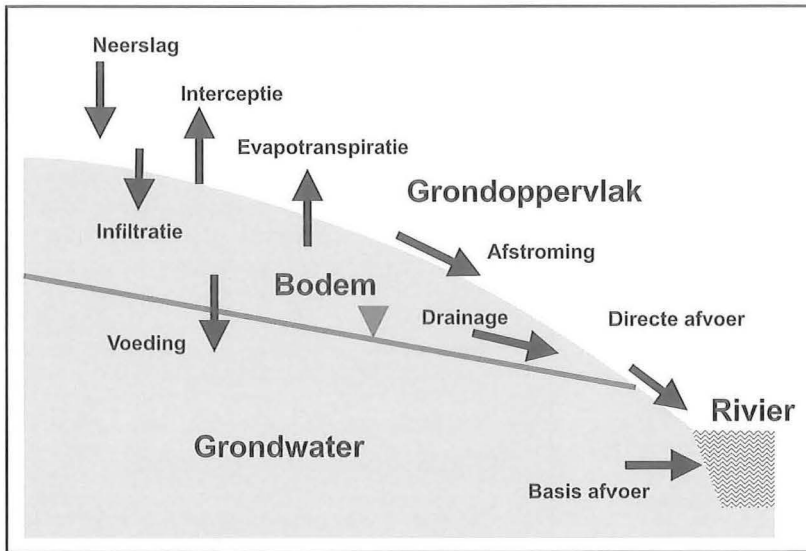
De studie werd toegespitst op het Steinsel subbekken van de Alzette. Dit subbekken (Figuur 1) heeft een oppervlakte van 408 km²; de topografie varieert van 225 tot 450 m en de gemiddelde helling bedraagt 7%. De bodems bestaan uit zand-leem en leem op de plateaus, en kleileem en zandige kleileem in de valleien. Dit gebied is één van de meest geurbaniseerde zones in Europa, met Luxemburg stad en Esch-sur-Alzette (Figuur 1), die ongeveer 21% van het stroomgebied omvatten; daarnaast zijn er 23% landbouwgronden, 29% graslanden en 24% bossen. Het klimaat wordt gekenmerkt door een vrij uniform verdeelde neerslag van 800 tot 1000 mm per jaar, en temperaturen gaande van 1°C in de winter tot 17°C in de zomer (Pfister et al., 2002). De gemiddelde afvoer gemeten te Steinsel bedraagt 5,6 m³/s en varieert tussen 1 en 50 m³/s. Overstromingen komen vrij frequent voor door de verzadigde bodems en lage evapotranspiratie in de winter.

Voor de toepassing in het WetSpa model zijn er drie basiskaarten nodig in digitale vorm: een hoogtemodel, bodemtypes en landgebruik. Een hoogtemodel was beschikbaar met een hoogte-resolutie van 2 m. Bodemtypes werden afgeleid van de Bodemkaart van de Europese Gemeenschap op schaal 1/100,000 en landgebruik uit satellietbeelden van 1995 (Figuur 5a). Voor de periode december 1996 tot maart 2001 zijn

Figuur 1. Basisplan met aanduiding van het studiegebied.



Figuur 2. Schematisch overzicht van de hydrologische processen gesimuleerd met het WetSpa model.



uurlijkse afvoergegevens ter beschikking in 4 stations, en uurlijkse of dagelijkse neerslaghoeveelheden in 10 stations. De potentiële evapotranspiratie is gekend voor de luchthaven van Luxemburg stad.

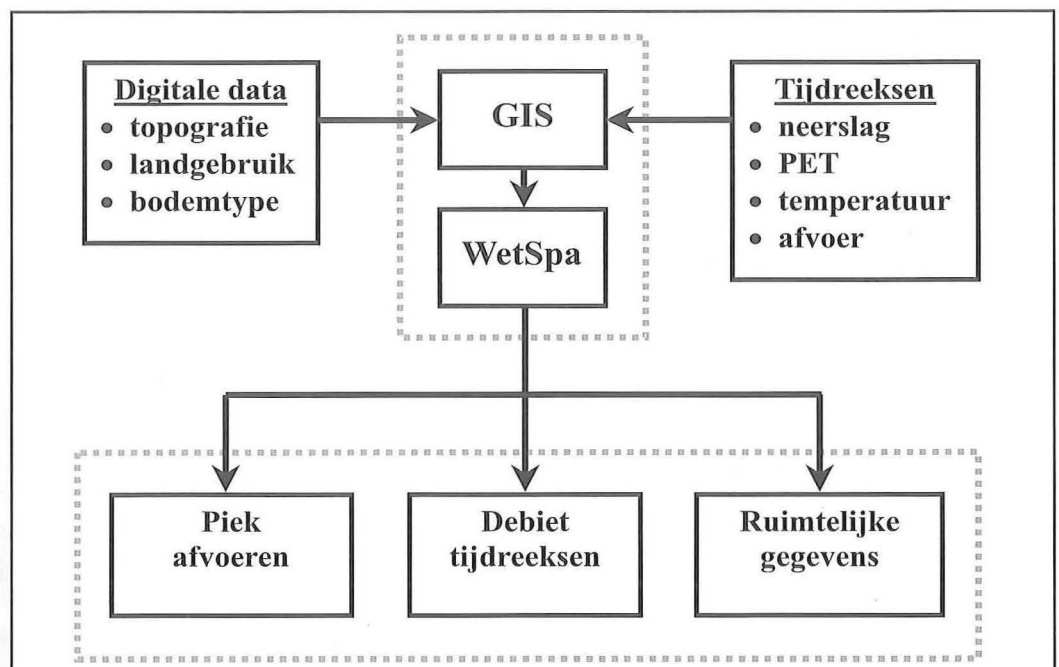
2. Het WetSpa model

Het Water and Energy Transport in Soil, Plant and Atmosphere (WetSpa) model is een numeriek ruimtelijk verdeeld hydrologisch simulatiemodel oorspronkelijk opgesteld door Wang et al. (1997) en aangepast door De Smedt et al. (2000, 2004), Liu et al. (2003) en Liu (2004). Hierbij wordt het stroomgebied verdeeld in een netwerk van reken-

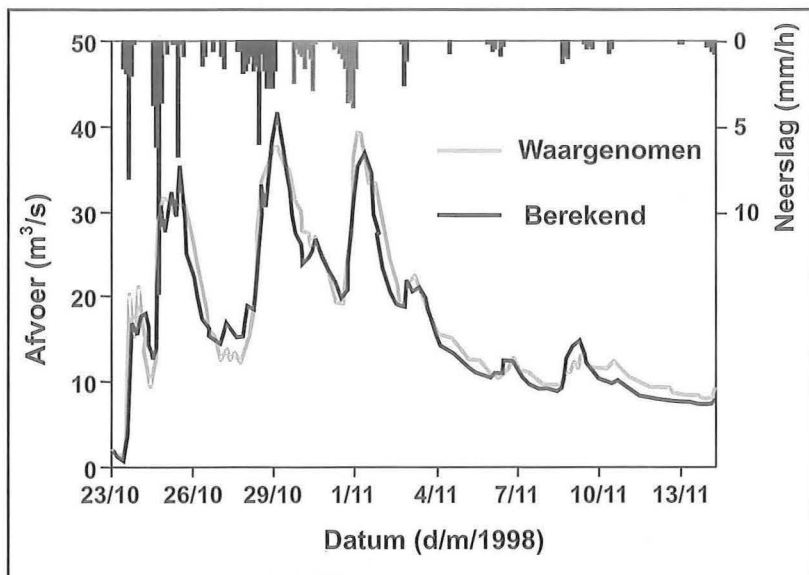
cellen met 4 lagen, zijnde het grondoppervlak met vegetatie, de wortelzone, de onverzadigde zone, en de verzadigde grondwaterzone. De hydrologische processen die in het model gesimuleerd worden zijn neerslag, interceptie, oppervlakteberging, oppervlakte-afstroming, infiltratie, evapotranspiratie, percolatie, bodemdrainage, grondwateraanvulling en grondwater-drainage. Het model laat toe om de afvoer te voorspellen in een rivierbekken alsook de ruimtelijke verdeling van hydrologische processen en variabelen. Het rekenproces is gebaseerd op geografische informatiesysteem (GIS) modules waarbij voor elke rastercel de verschillende componenten en variabelen van de hydrologische cyclus, zoals voorgesteld in Figuur 2, begroot worden. De rekenprocedures worden gegeven in Liu (2004), Liu et al. (2004a) en Liu & De Smedt (2005).

De meerderheid van de modelparameters zijn vastgelegd door middel van tabellen, die de eigenschappen van de bodem en het grondoppervlak relateren tot de basis GIS-kaarten. Met de topografie worden de richting en grootte van de afstroming bepaald. Met de bodemkaart worden de porositeit, waterhoudend vermogen, conductiviteit, en andere hydrologische karakteristieken van de bodems bepaald. De landgebruikskaart levert informatie betreffende de worteldiepte, weerstand tegen oppervlakte-afstroming, interceptiecapaciteit, oppervlaktebeweging, e.d. Door combinatie van al deze gegevens worden kaarten bekomen van potentiële afvoercoëfficiënten, gemiddelde duur van de oppervlakte-afstroming en de afvlakking van afvoergolven. Met behulp van deze GIS kaarten worden uurlijkse hydrogrammen gegenereerd in functie van de neerslag en potentiële verdamping (Figuur 3).

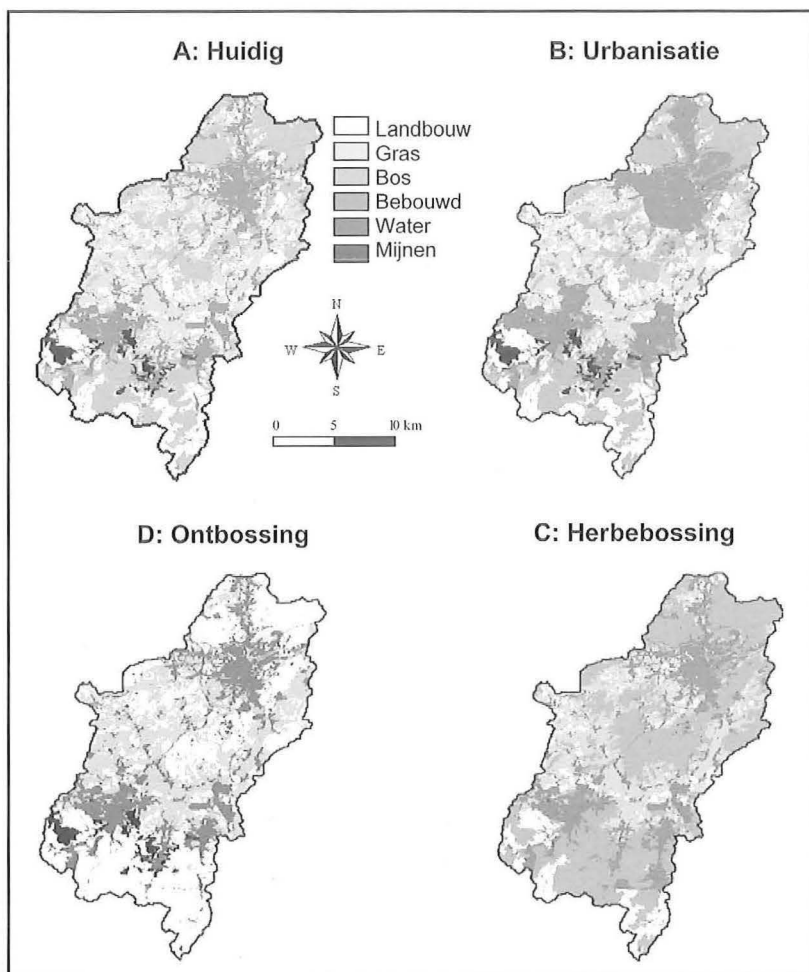
Figuur 3. Schematisch overzicht van het rekenconcept van het WetSpa model: de invoergegevens zijn digitale data en tijdreeksen die verwerkt worden met GIS modules, de output geeft piekafvoeren, tijdreeksen van debieten en ruimtelijk verdeelde hydrologisch parameters en variabelen.



Figuur 4. Typisch resultaat bekomen met het WetSpa model: waargenomen en gesimuleerde uurtijds afvoer voor enkele stormen in oktober-november 1998.



Figuur 5. Landgebruiks-scenario's: (a) landgebruik anno 1995, (b) toename in urbanisatie, (c) ontbossing en (d) herbebossing.



Het WetSpa model werd gekalibreerd met gegevens opgemeten in het Stijnselbekken van december 1996 tot maart 2001 (Gebremeskel, 2004). Figuur 4 toont een typisch resultaat; het betreft de afvoer voor een bijzondere stormperiode van

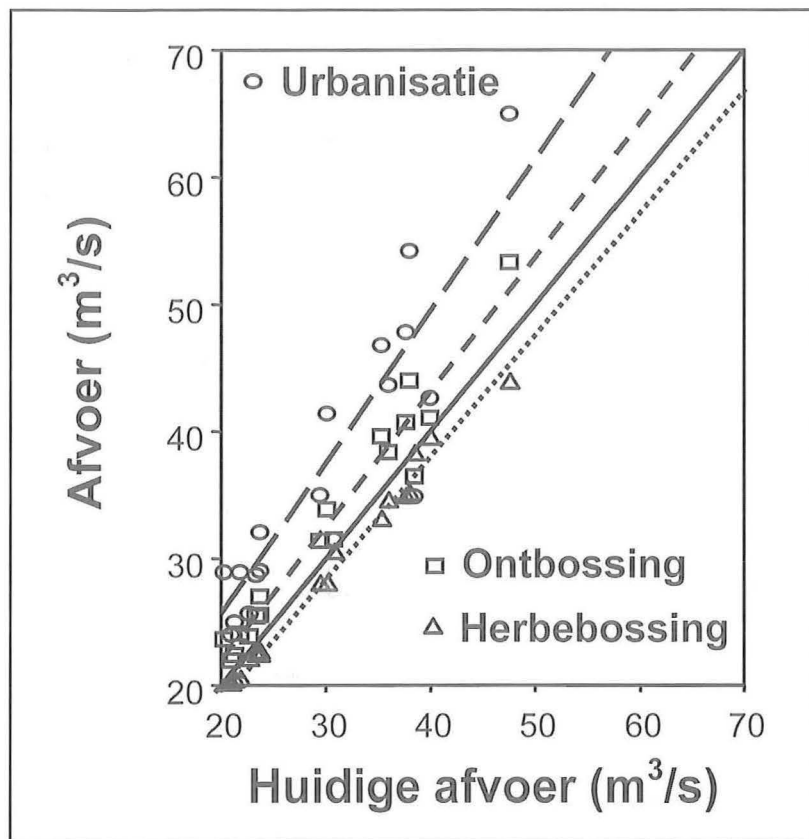
einde november tot begin december 1998, met een totale neerslag van 193 mm. Het hydrogram vertoont drie piekafvoeren met waargenomen debieten van 33, 39 en 40 m³/s; de voorspelde afvoeren bedragen respectievelijk 34, 43 en 38 m³/s. De performantie van het model kan geëvalueerd worden met behulp van criteria voorgesteld door Hoffman et al. (2004): gemiddelde procentuele modelafwijking en model efficiëntie, ofwel de Nash-Sutcliffe coëfficiënt, voor alle afvoeren ofwel afzonderlijk voor de lage afvoeren en de piekafvoeren. De resultaten tonen aan dat het model de waargenomen afvoer goed kan reproduceren voor alle meetstations in het Steinselbekken: de gemiddelde fout bedraagt minder dan 3% en de efficiëntie is 78% tot 92%.

3. Invloed van het landgebruik

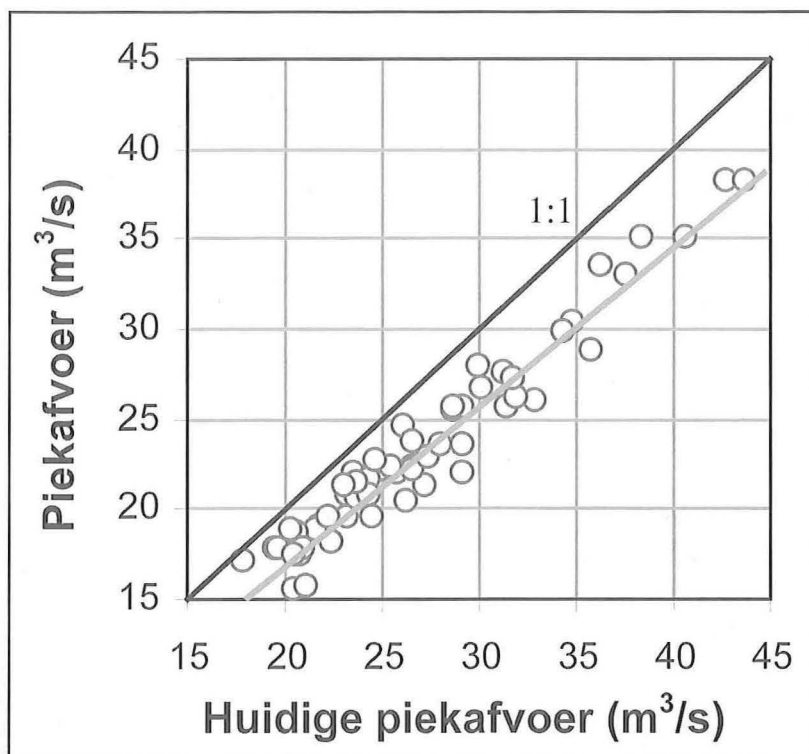
Veranderingen in het landgebruik hebben een belangrijke impact op infiltratie van neerslag in de bodem, afstroming en berging van neerslag aan het grondoppervlak. Met behulp van het WetSpa model kan de invloed van het landgebruik op rivierafvoer ingeschat worden (Gebremeskel, 2004; Liu et al. 2004b, 2006a; Gebremeskel et al., 2005a). Drie landgebruikscenario's werden onderzocht, weergegeven in Figuur 5. Figuur 5a toont het huidige landgebruik anno 1995. Figuur 5b geeft een urbanisatie-scenario waarbij de bebouwing is toegenomen ten koste van de landbouw. Figuur 5c geeft een ontbossing-scenario waarbij alle bossen omgezet werden in landbouwgebied (akkers en weiden). Figuur 5d toont een herbebossing-scenario waarbij de bossen uitgebreid worden ten koste van landbouwgebied. Het urbanisatie-scenario is gebaseerd op actuele gegevens betreffende de evolutie van het landgebruik; de andere zijn artificiële scenario's die inzicht verschaffen betreffende invloed van bossen op de hydrologische cyclus.

Met behulp van deze landgebruikgegevens werd met het WetSpa model de invloed op de rivierafvoer bepaald. Figuur 6 geeft gesimuleerde piekafvoeren voor de ganse simulatieperiode. In de figuur wordt de gesimuleerde piekafvoer voor de verschillende scenario's uitgezet t.o.v. de gesimuleerde afvoer voor de huidige toestand. Hieruit blijkt dat het urbanisatie-scenario een gemiddelde toename in piekafvoer geeft van 26%. Het ontbossing-scenario resulteert in een toename van 5%, terwijl het herbebossing-scenario de piekafvoeren slechts in zeer beperkte mate reduceert met slechts 3%. Met het model werd nagegaan welke processen verantwoordelijk zijn voor de wijziging in piekafvoer. Hieruit blijkt dat de toestand voorafgaand aan een storm erg belangrijk is en zeer variabele gevolgen heeft. De meest ongunstige toestand m.b.t. overstromingen is een grotendeels volledig verzadigde bodem, waardoor de oppervlakteafstroming maximaal wordt en berging en infiltratie minimaal. Het blijkt dat het landgebruik daarbij van ondergeschikte rol is, immers de afstroming wordt grotendeels bepaald door de ondoorlaatbaarheid van de bodem en

Figuur 6. Resultaat van de landgebruiks-scenario's: gesimuleerde piekafvoer voor elk scenario uitgezet volgens gesimuleerde piekafvoer voor het landgebruik anno 1995.



Figuur 7. Resultaat van natuurlijk herstel van brongebieden: gesimuleerde piekafvoer na natuurherstel uitgezet volgens gesimuleerde piekafvoer voor de huidige toestand.



de topografische gesteldheid, meer bepaald de helling en tijdsduur van de oppervlakte-afstroming. Daarentegen blijkt dat de verschillende landgebruikscenario's wel een grote invloed hebben op de gemiddelde afvoer en vooral op de droogweerafvoer, waarbij het herbebossing-scenario het meest gunstige is (grote basisafvoer en retentie) en het urbanisatie-scenario het meest ongunstige is (kleine basisafvoer en weinig retentie).

4. Natuurherstel van waterlopen

De bovenloop en brongebieden van waterlopen hebben een belangrijke functie m.b.t. berging en transport van water. Bovendien worden de brongebieden meer beïnvloed door de vegetatie en geomorfologie dan de benedenloop. Daarom is het mogelijk zinvol om deze gebieden in hun natuurlijke staat te herstellen waardoor overstromingen in de benedenloop in belangrijke mate beperkt worden (Mohl, 2004). Een methode om dergelijke effecten te begroten met het WetSpa model werd voorgesteld door Gebremeskel (2004) en Liu et al. (2004c). Het blijkt dat de eerste en tweede orde waterlopen in het Alzettebekken 320 km² of 79% van het bekken ontwateren. De totale lengte van deze waterlopen bedraagt 425 km ofwel 76% van het totale waterlopenstelsel.

Vier eigenschappen zijn van belang bij de afvoer: de stromingsweerstand, de meandering, de helling en de waterdiepte. Indien men waterlopen in hun natuurlijke toestand laat terugkeren, dan zal door de vegetatie en de afkalving van de oevers de weerstand toenemen. Ook de meandering zal toenemen wanneer men de waterloop vrij laat om zich een weg te banen doorheen het landschap. Dit resulteert in een reductie van de helling, vermits de lengte toeneemt voor eenzelfde verval. De waterdiepte kan mogelijk toenemen door de verminderde afstroming wat de weerstand dan weer zal verlagen, maar het is meer waarschijnlijk dat de waterloop zal verbreden en er poelen ontstaan waarin het overtollige water geborgen wordt zonder toename van de waterdiepte.

Een onmiddellijk gevolg van natuurlijk herstel van waterlopen is dus een vermindering van de stroomsnelheid waardoor de totale afstromingstijd groter wordt en samenvloeiing in de benedenloop meer verspreid in de tijd. De verblijftijd van het water in de Alzette bedraagt minder dan 10 uur tot aan Steinsel, maar de stromingstijd vanaf de meest veraf gelegen brongebieden loopt op tot meer dan 35 uur. Met WetSpa werd berekend dat door het natuurlijk herstel van de brongebieden de toename in totale afstromingstijd tot 5 uur kan bedragen. Hierdoor ontstaat er een afname in piekafvoer omdat een langere stromingstijd aanleiding geeft tot meer afvlakking en tot een meer in de tijd verspreide samenvloeiing van verschillende bovenlopen. Dit effect wordt geïllustreerd in Figuur 7, waar een overzicht wordt gegeven van de gesimuleerde piek-

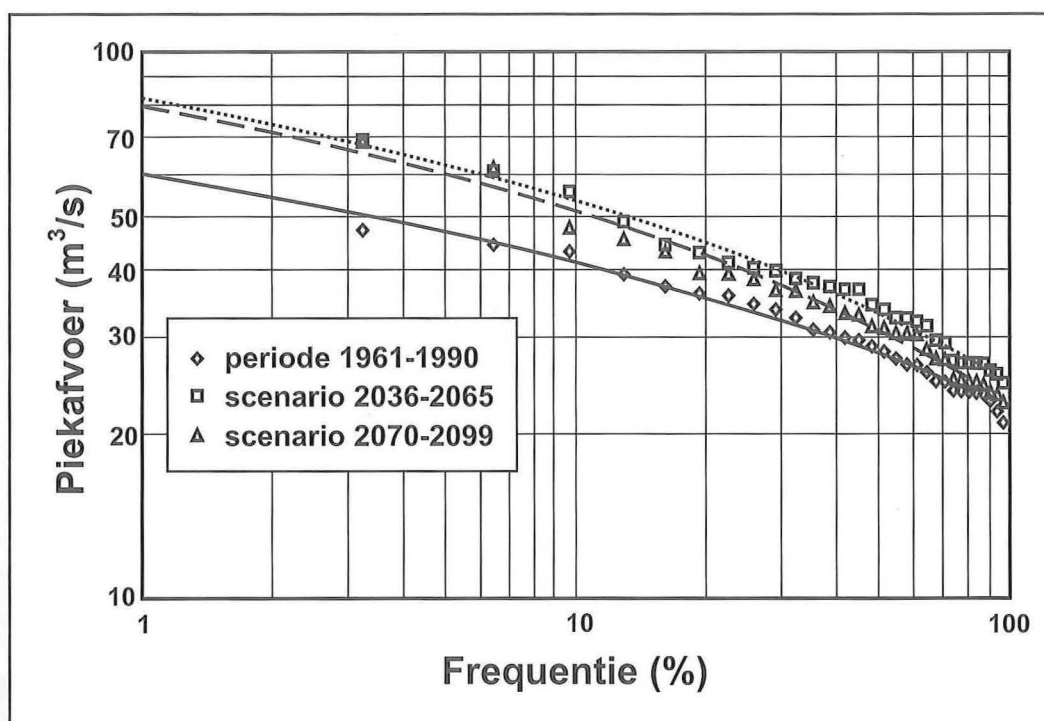
afvoer na natuurherstel in functie van de piekafvoer onder de huidige omstandigheden. Hieruit volgt dat er gemiddeld een reductie van 14% zou optreden, wat misschien minder is dan verwacht. De reden is opnieuw identiek als voor het herbebossing-scenario: stormafvoer is een extreem proces gedomineerd door algehele afstroming in het bekken, waarbij andere hydrologische eigenschappen van minder belang zijn. Daarentegen heeft natuurlijk herstel van brongebieden wel een grote impact op de gemiddelde stromingsomstandigheden.

5. Invloed van klimaatsverandering

Studies hebben aangetoond dat door een significante stijging van westelijke luchtcirculaties er meer stormen voorkomen in het Alzette bekken vanaf de jaren 1970 (Pfister et al., 2000; Pfister et al., 2004). De toename in neerslagintensiteit en -duur heeft uiteraard consequenties voor de rivierafvoer. Het is daarom nodig dergelijke fenomenen te onderzoeken en wat hiervan de gevolgen zullen zijn in de toekomst. Toekomstige klimaatscenario's werden overgenomen van een derde generatie mondiaal klimaatsmodel ontwikkeld door de U.K. Meteorological Office, Hadley Centre (Gordon et al., 2000). De resultaten van dit model werden omgezet naar het Alzettebekken met behulp van SDSM (statistical downscaling model) van Wilby & Dettinger (2002), met behulp van correlaties tussen de klimaatsvariabelen en de dagelijks waargenomen temperatuur en neerslag op de luchthaven van Luxemburg. Daarna worden de variabelen met de hoogste correlatie gebruikt om neerslagen te voorspellen in het Alzette bekken voor de referentieperiode

1961-1990 en voor toekomstige periodes 2036-2065 en 2070-2099 (Gebremeskel, 2004; Gebremeskel et al., 2005b). De referentieperiode wordt gebruikt om na te gaan of de neerslag bepaald met het model en de hiermee gesimuleerde afvoer met WetSpa overeenkomen met de waarnemingen. Hierna worden neerslagreeksen voor de toekomstige periodes opgesteld en als input gebruikt in het WetSpa model. De toekomstige periodes werden groot genoeg gekozen om een statische analyse uit te voeren van de gesimuleerde afvoerreeksen. De resultaten tonen aan dat er in de toekomst beduidend meer neerslag zal vallen in de winter. De laatste periode 2070-2099 wordt ook gekenmerkt door hogere temperaturen waardoor de verdamping toeneemt wat de toename in neerslag zal compenseren. Uit de resultaten van WetSpa volgt dat er een toename van ongeveer 40% in de afvoer is voor 2036-2065 en 20% voor 2070-2099. De grootste toename situeert zich in de winter, waarbij de afvoeren bijna verdubbelen. Het effect op de piekafvoeren wordt voorgesteld in Figuur 8. In deze figuur worden de frequenties van de piekafvoeren weergegeven. Voor de referentieperiode bedraagt de voorspelde piekafvoer voor een terugkeerperiode van 100 jaar (1% gemiddelde voorkomingskans per jaar) ongeveer 60 m³/s, terwijl dit voor de toekomstige periodes zal oplopen tot 80 m³/s en meer. Ook voor lagere frequenties is er een significante toename in de afvoer. De kans op overstroming zal dus in belangrijke mate toenemen.

Figuur 8. Resultaat van klimaatsverandering: frequentie (gemiddelde voorkomingskans per jaar) van gesimuleerde piekafvoer voor de huidige toestand en twee toekomstige klimaatscenario's.



6. Conclusies

Het WetSpa model is uiterst geschikt voor de analyse van hydrologische processen in een stroomgebied. De benodigde gegevens voor het toepassen van het model beperken zich tot een GIS bestand van topografie, landgebruik en bodemtypes en tijdreeksen van neerslag en potentiële verdamping. Alle andere hydrologische variabelen zijn vervat in referentie-databestanden. Het model levert gesimuleerde afvoerreeksen en gebiedsdekkende hydrologische toestandvariabelen zoals infiltratie, oppervlakte-afstroming, afstromingstijd, verdamping, enz. Het model werd toegepast op het Alzette bekken in het Groot-hertogdom Luxemburg. In een eerste toepassing werd het effect van landgebruik nagegaan. Er werden drie scenario's onderzocht: urbanisatie, ontbossing en herbebossing. Analyse van de resultaten toont aan dat urbanisatie de piekafvoer kan doen toenemen met 26%, ontbossing met 5% en herbebossing een daling geeft van 3%. Deze resultaten wijzen op het belang van een ruimtelijke ordening in functie van integraal waterbeheer, alhoewel de impact op piekafvoeren misschien kleiner is dan wat tot nu toe verondersteld werd.

Een tweede toepassing betrof het effect van natuurherstel van brongebieden. In de veronderstelling dat waterlopen vrij gelaten worden om te ontwikkelen op natuurlijke wijze, kunnen piekafvoeren verminderd worden met 14%. Dergelijk scenario impliceert een toename van het overstromingsrisico in de opwaartse stroomgebieden die minder catastrofaal is en mogelijks zelfs ecologisch verantwoord zijn, terwijl urbane gebieden in de benedenloop gevrijwaard worden van overstromingsrisico's.

Een derde toepassing betreft de invloed van klimaatwijzigingen. Met een klimaatmodel werden de toekomstige neerslag en temperatuur voorspeld voor het Alzette bekken. Hieruit blijkt dat er een belangrijke toename in de neerslag te verwachten is, terwijl op het eind van de eeuw er ook een toename is in de verdamping. Simulatie met het WetSpa model toont aan dat hieruit een belangrijke toename zal volgen van de winterafvoer en dat de kans op overstromingen in sterke mate zal toenemen.

Het WetSpa model wordt nog verder ontwikkeld en geverifieerd op verschillende andere rivierbekkens, zoals het Suoimuoi bekken in Vietnam (Liu et al., 2004d, 2005a), het Simiyu bekken in Tanzania (Rwatabula & De Smedt, 2005, 2006), de Hornad in Slowakije (Liu et al., 2005b, 2006b; Bahremand et al., 2005a, 2005b; Bahremand & De Smedt, 2006; Bahremand et al., 2006a, 2006b), en de Suriname rivier in Suriname (Nurmohamed et al., 2006).

Referenties

Bahremand, A., Corluy, J., Liu, Y.B., De Smedt,

F., Poorova, J. and Velcicka, L., 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. In: Van Alphen, J., van Beek, E., & Taal, M. (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor & Francis Group, London: 67-74.

Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, J., Y.B. Liu, Y.B., J. Poorova, L. Velcicka, and E. Kunikova, 2005. Application of WetSpa model for assessing landuse impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. *Proceedings of 10th International Specialist Conference on Watershed and River Basin Management*, Calgary, Canada, September 12-16, 2005.

Bahremand, A., and F. De Smedt, 2006. Sensitivity and uncertainty analysis of a GIS-based flood simulation model using PEST. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 1(2): 29-37.

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L. and Kuniková, E., 2006, Application of WetSpa model for assessing landuse impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia, *Water Science and Technology*, 53(10): 37-45. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2006.295>

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L. and Kuniková, E., 2006. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods by in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. *Water Resources Management Journal*: online first. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9089-0>

De Smedt, F., L. Y. Liu, and S. Gebremeskel, 2000. Hydrologic modelling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. C. A. Brebbia (ed.), *Risk Analyses II*, WIT press, Southampton, Boston: 295-304.

De Smedt, F., Y. B. Liu, S. Gebremeskel, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004. Application of GIS and remote sensing in flood modeling for complex terrain. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*, IAHS Publ. 289: 23-32.

Gebremeskel, S., 2004. Modelling the effect of climate and land-use changes on the hydrological processes: An integrated GIS and distributed modeling approach, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Gebremeskel, S., Y. B. Liu, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2005a. Assessing the hydrological effects of land-use changes using distributed modelling and GIS. *Intl. J. River Basin Management* 3(4): 265-275.

Gebremeskel, S., Y. B. Liu, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2005b. Analysing the effect of climate changes on streamflow using statistically downscaled GCM scenarios. *Intl. J. River Basin Management* 2(4): 271-280.

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B. and R.A. Wood, 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux

adjustments, *Climate Dynamics* 16, 147-168.

Hoffmann L, El Idrissi A, Pfister L, Hingray B, Guex F, Musy A, Humbert J, Drogue G. and T. Leviandier, 2004. Development of regionalized hydrological models in an area with short hydrological observation series, *River Research and Applications* 20(3), 243-254.

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modelling. *Journal of Hydrology*, 283: 91-106. doi:10.1016/S0022-1694(03)00242-7

Liu, Y.B., 2004. Development and application of a GIS-based hydrological model for flood prediction and watershed management, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Liu, Y. B., F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004a. Parameterization using ArcView GIS in medium and large watershed modeling. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*, IAHS Publ. 289: 50-58.

Liu, Y. B., F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004b. Assessing land use impact on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental Modeling and Assessment*, 9(4): 227-235. doi:10.1007/s10666-005-0306-7

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004c. Simulation of flood reduction by natural river restoration using a distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6): 1129-1140. www.hydrol-earth-syst-sci.net/8/1129/2004/

Liu, Y.B., Batelaan, O., Huong, N.T., Tam, V.T. and F. De Smedt, 2004d, Flood prediction in the karst Suoimuoi catchment, Vietnam. *Trans-KARST 2004, Proceedings of the International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions*, Hanoi, Vietnam, 13-18.9.2004. Eds. O. Batelaan, M. Dusaar, J. Masschelein, Vu Thanh Tam, Tran Tan Van, Nguyen Xuan Khien: 139-144.

Liu, Y. B. and F. De Smedt, 2005. Flood modelling for complex terrain using GIS and remote sensed information. *Water Resources Management*, 19: 605-624. doi: 10.1007/s11269-005-6808-x

Liu, Y.B., O. Batelaan, F. De Smedt, N.T. Huong, and V.T. Tam, 2005a. Test of a distributed modelling approach to predict flood flows in the karst Suoimuoi catchment in Vietnam. *Environmental Geology*, 48: 931-940. doi: 10.1007/s00254-005-0031-1

Liu, Y.B., Batelaan, O., De Smedt, F., Poorova, J. and L. Velcicka, 2005b. Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST. Van Alphen, J., van Beek, E., & Taal, M. (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor & Francis Group, London: 317-326.

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2006a. Predicting storm runoff from different land use classes using a GIS-

based distributed model. *Hydrological Processes* 20: 533-548. doi:10.1002/hyp.5920

Liu, Y.B., J. Corluy, A. Bahremand, F. De Smedt, J. Poorova, and L. Velcicka, 2006b. Simulation of runoff and phosphorus transport in a Carpathian catchment, Slovakia. *River Research and Applications* 22: 1009-1022. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.953>

Mohl, A., 2004. LIFE River restoration projects in Austria, in Dragutin, G. (ed.), *River Restoration 2004, Proceedings of the 3rd European Conference on River Restoration*, Zagreb, 201-209.

Nurmohamed, R., S. Naipal and F. De Smedt, 2006. Hydrologic modeling of the Upper Suriname River basin using WetSpa and ArcView GIS. *Journal of Spatial Hydrology* 6(1): 1-17.

Pfister, L., Humbert, J. and L. Hoffmann, 2000. Recent trends in rainfall-runoff characteristics in the Alzette river basin, Luxembourg, *Climate Change* 45(2), 323-337.

Pfister L., Humbert, J., Iffly, J.F. and L. Hoffmann, 2002. Use of regionalized stormflow coefficients in view of hydro-climatological hazard mapping, *Hydrological Sciences Journal* 47, 479-491.

Pfister, L., Kwadijk, J., Musy, A., Bronstert, A. and L. Hoffmann, 2004. Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine-Meuse basins, *River Research and Applications* 20(3), 229-241.

Rwetabula, J. and F. De Smedt, 2005. Prediction of Simiyu river (tributary of Lake Victoria, Tanzania) discharge using WetSpa Model, GIS and remote sensed landuse data. *Proceedings of the 6th International Conference of European Water Resources Association (EWRA)*, Menton, France. 4 pp.

Rwetabula, J. and F. De Smedt, 2006. Runoff and phosphorous loading estimation for Simiyu catchment (tributary of Lake Victoria), Tanzania. In Starret, S.T., Hong, J.J., Lyon, W.G. (eds.), *Environmental Science and Technology*, American Science Press, Houston, USA, Vol. 2, 6 pp. ISBN: 0-9768853-7-9

Wang, Z., Batelaan, O. and F. De Smedt, 1997. A distributed model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa), *Physics and Chemistry of the Earth* 21(3), 189-193.

Wilby, R.L. and M.D. Dettinger, 2002. Streamflow changes in the Sierra Nevada, California, simulated using a statistically downscaled General Circulation Model Scenario of climate change, in McLaren, S. and Kniveton, D. (eds.), *Linking climate change to land surface change*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 6.1- 6.20.

Florimond De Smedt en Okke Batelaan

Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, 02/629.35.47, fdesmedt@vub.ac.be

Gecombineerd gebruik van hydrologische modellen en afstandswaarnemingen voor waterbeheersdoeleinden

Bij het integraal waterbeheer vormen hydrologische modellen een onmisbaar instrument. Deze modellen gebruiken een aantal verschillende inputdatabestanden, meer bepaald meteorologische, topografische, bodem-, en vegetatiegegevens. Vermits al deze verschillende gegevens een zekere graad van onzekerheid bevatten en ook omdat modellen nooit een perfecte weergave van de werkelijkheid zijn, is het normaal dat de resultaten van deze modellen nooit foutloos zullen zijn. Een van de technieken om de fouten in hydrologische (en andere) modellen te reduceren is data-assimilatie. In dit artikel wordt dieper ingegaan op deze techniek. Verder wordt een voorbeeld gegeven van een toepassing van data-assimilatie, samen met een overzicht van de mogelijke toepassingen voor het integraal waterbeheer in Vlaanderen.

Inleiding

De studie van het verband tussen neerslag en afvoer vormt het onderzoeksdomein van de hydrologie. Samengevat komt dit neer op het bieden van een antwoord op de vraag "What happens to the rain [Penman, 1961]". Om deze doelstelling te bereiken werden hydrologische modellen ontwikkeld. Deze modellen integreren de fysische beschrijving van een aantal processen, zoals bijvoorbeeld de infiltratie of de verdamping, waarbij telkens een aantal verschillende parameters nodig zijn. Bijvoorbeeld hangt de infiltratie onder andere af van het bodemtype, is de verdamping afhankelijk van het gewastype, het ontwikkelingsstadium van het gewas, enzovoort. Om deze modellen toe te passen zijn dus topografische, gewas-, bodem- en meteorologische gegevens nodig. Vermits deze gegevens nooit foutloos zijn (stroomgebiedsgemiddelde neerslag is bijvoorbeeld erg moeilijk of zelfs onmogelijk te begroten) en ook omdat een model altijd slechts een benadering is van de werkelijkheid, zullen de resultaten van deze modellen nooit perfect zijn.

Om deze fouten in hydrologische modellen te verkleinen werden een aantal methodes ontwikkeld. Deze kunnen onderverdeeld worden in modelkalibratie en data-assimilatie. Bij modelkalibratie wordt het model toegepast gedurende een bepaalde periode, bijvoorbeeld een jaar, en worden de modelresultaten vergeleken met een aantal metingen ervan. Een veel voorkomende toepassing van modelkalibratie is het gebruik van gemeten afvoer. De modelresultaten worden vergeleken met de metingen en indien er onvoldoende overeenkomst is met de metingen, worden een aantal parameterwaarden aangepast, wordt het model opnieuw toegepast en worden de nieuwe resultaten opnieuw vergeleken met de metingen. Dit proces wordt herhaald tot de overeenkomst tussen de resultaten en de metingen voldoende is. Een groot aantal methodes werd hiervoor ontwikkeld, variërend van volledig manuele tot volledig automatische parameteraanpassing.

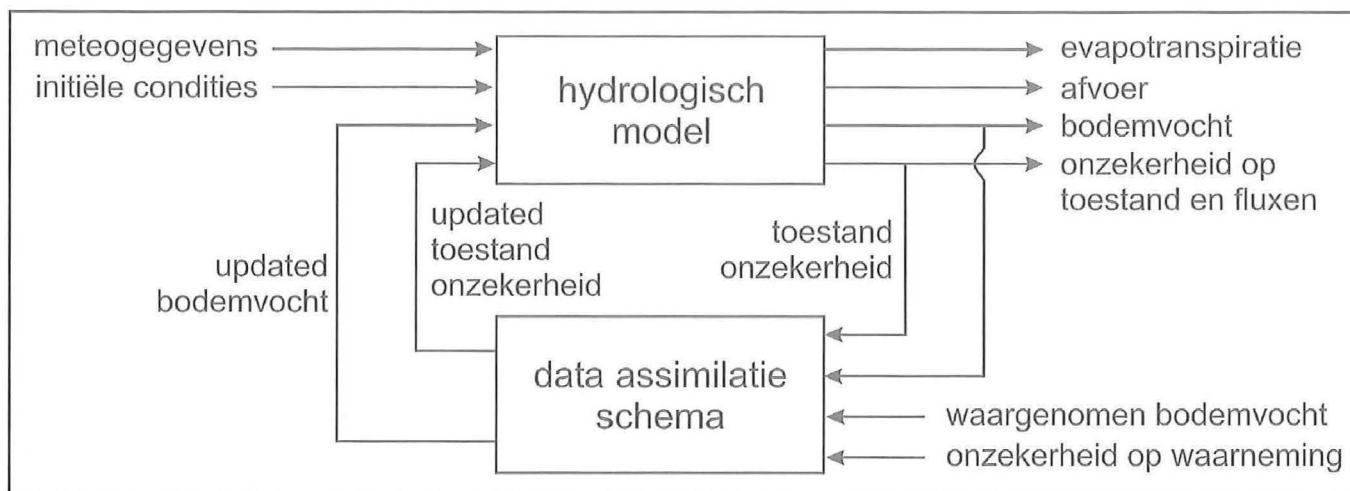
Bij data-assimilatie worden de modelresultaten aangepast gedurende de modeltoepassing. Een veel voorkomende toepassing van data-assimilatie is het aanpassen van de gemodelleerde bodemvochtwaarden. Als op een bepaald moment een meting van het bodemvocht beschikbaar is, kan een gewogen gemiddelde gemaakt worden tussen het modelresultaat enerzijds en de meting anderzijds waarbij het modelresultaat gelijk gesteld wordt aan dit gewogen gemiddelde. De gewichten worden dan bepaald op basis van de onzekerheid in zowel de modelresultaten als de metingen.

Het doel van dit artikel is het beschrijven van hoe data-assimilatie kan toegepast worden voor het integraal waterbeheer in Vlaanderen. Vooreerst wordt dieper ingegaan in de operationele toepassing van data-assimilatie. Verder wordt dan een voorbeeld van data-assimilatie voor waterbeheersdoeleinden gegeven. Tenslotte worden een aantal voorstellen gesuggereerd tot het gebruik van data-assimilatie voor het integraal waterbeheer in Vlaanderen.

Data-assimilatie

Een algemeen aanvaarde definitie van data-assimilatie is het aanpassen van modelresultaten gebruik makende van externe gegevens. Een voorbeeld hiervan is het aanpassen van de bodemvochtwaarden van de bovenste bodemlaag gebruik makend van metingen hiervan. Deze aanpassing gebeurt door het gewogen gemiddelde te nemen van de modelresultaten en de externe data, waarbij de gewichten afhankelijk zijn van de graad van onzekerheid in zowel de modelresultaten en de externe gegevens. Indien bijvoorbeeld de onzekerheid in de modelresultaten groot is, en de onzekerheid in de externe data klein, zal bij de aanpassing een groot gewicht gegeven worden aan de externe gegevens. Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de toepassing van data-assimilatie.

Figuur 1. Schematisch overzicht van de toepassing van data-assimilatie.

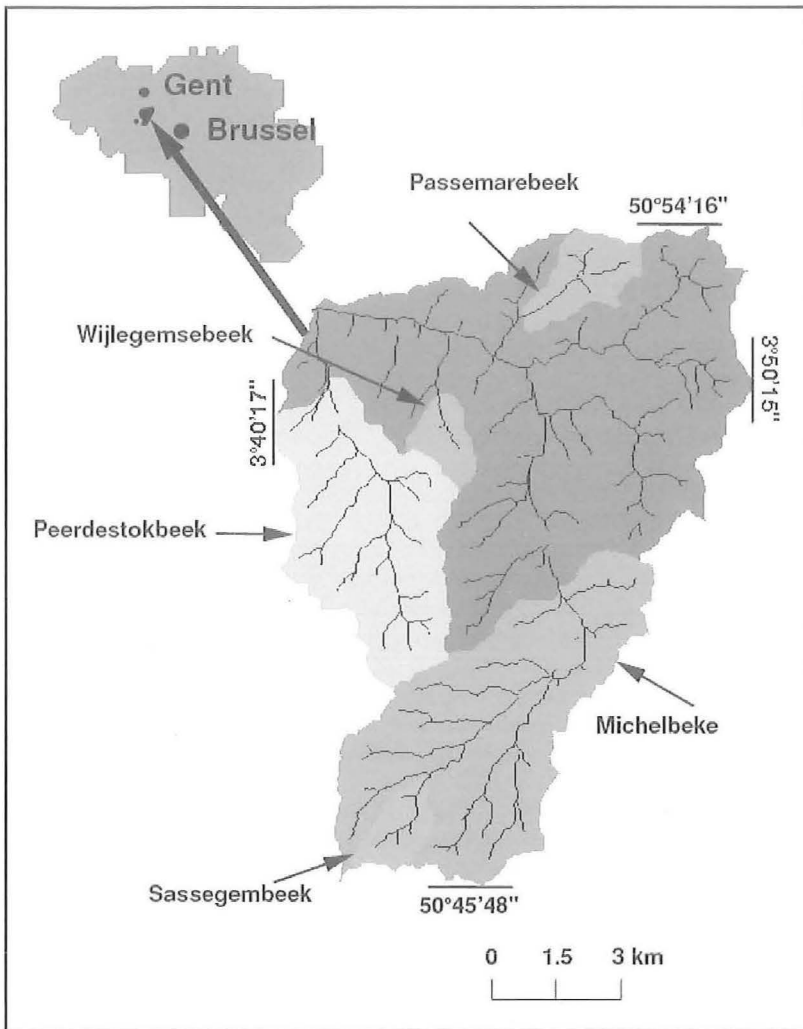


Om het gewogen gemiddelde te maken zijn er een aantal verschillende methodes beschikbaar. Houser et al. [1998] geeft een overzicht van een aantal van deze methodes. Deze variëren van eenvoudige statistische correctie tot "Newtoniaanse nudging". Bij statistische correctie wordt het gemodelleerde bodemvochtgehalte over gans het domein aangepast zodanig dat de statistieken (gemiddelde en variantie) ervan gelijk worden aan de statistieken van de externe waarnemingen. Er wordt dus geen rekening gehouden met de ruimtelijke patronen in de externe data. Bij "Newtoniaanse nudging" wordt hier wel rekening mee gehouden. Een methode die het laatste decennium veel aandacht gekregen heeft is het gebruik van de Kalman Filter, welke beschreven wordt in o.a. Hoeben en Troch [2000]. De Kalman Filter heeft een aantal voordelen. Ten eerste wordt de modelfout realistisch berekend, waardoor deze niet meer door de gebruiker gespecificeerd moet worden. Ten tweede kunnen toestandsvariabelen aangepast worden als er geen metingen van beschikbaar zijn. In Hoeben en Troch [2000] wordt het voorbeeld gegeven van een aanpassing van gans het gemodelleerd bodemvochtprofiel gebruik makend van metingen van enkel en alleen maar het bodemvochtgehalte van de bovenste paar centimeter van de bodem. Ten derde is het assimilatieschema erg flexibel. Dit betekent dat de aangepaste en de geobserveerde variabele niet noodzakelijk dezelfde hoeven te zijn. Er moet enkel een gekend verband bestaan tussen beide variabelen. Hoeben en Troch [2000] geven het voorbeeld van het rechtstreeks assimileren van radarterugkaatsingscoëfficiënten, welke afhankelijk zijn van het bodemvochtgehalte, in een hydrologisch model. De keuze van het assimilatie-algoritme is afhankelijk van een aantal factoren, waaronder in de eerste plaats de beschikbare rekenkracht. Verder zijn ook de vereiste nauwkeurigheid van de resultaten en de mogelijkheid tot softwareontwikkeling van de gebruiker van belang.

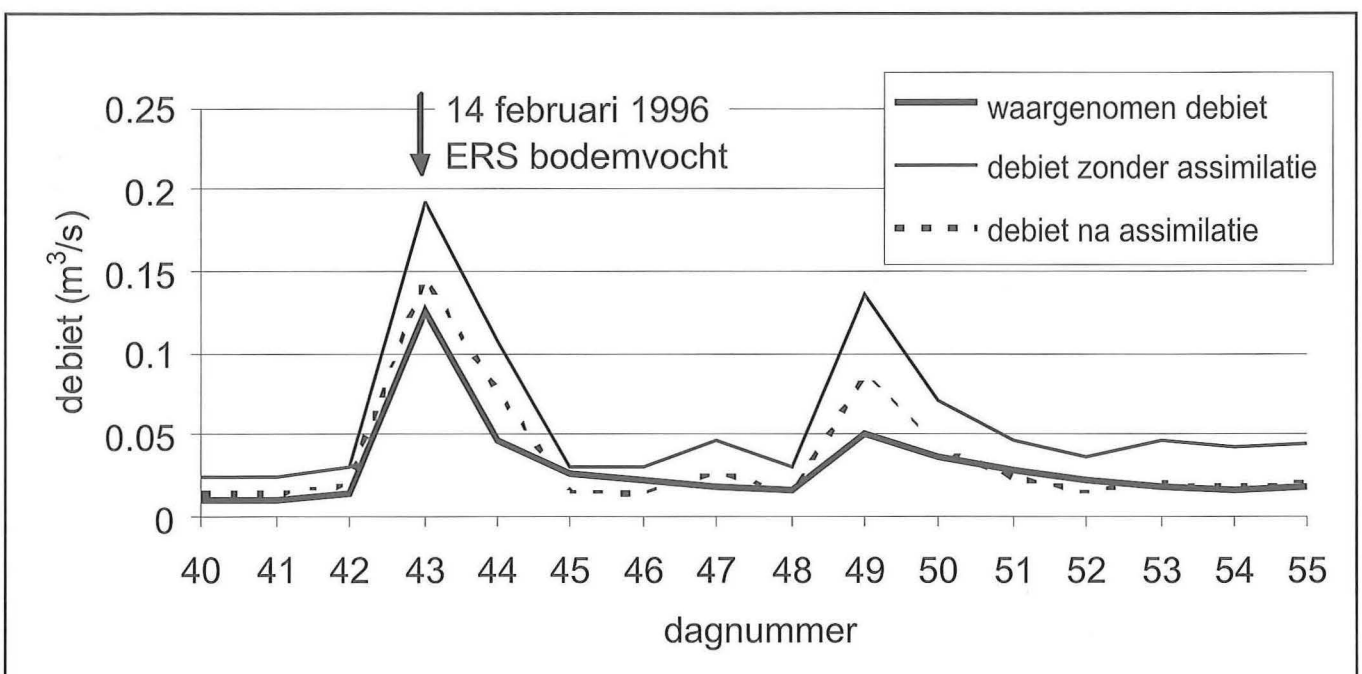
Voorbeeld

Om het potentieel gebruik van data-assimilatie voor waterbeheersdoeleinden te illustreren worden afstandwaargenomen bodemvochtwaarden in een statistisch hydrologisch model geassimileerd en wordt de invloed van deze assimilatie op de gemodelleerde afvoerpieken gekwantificeerd. De bodemvochtwaarden werden berekend gebruik makend van terugkaatsingscoëfficiënten van de European Remote Sensing (ERS) 1 en 2 satellieten. Deze zenden een elektromagnetisch signaal uit met een golflengte van 5.4 cm, waarna de sterkte van het teruggekaatste signaal gemeten wordt. Deze sterkte hangt o.a. af van het oppervlakkig bodemvochtgehalte. Deze omzetting van de terugkaatsingscoëfficiënt naar het oppervlakkig bodemvochtgehalte wordt gedetailleerd beschreven in Pauwels et al. [2002]. Als hydrologisch model werd het TOPMODEL-gebaseerd Land-Atmosphere Transfer Scheme [TOPLATS, Pauwels en Wood, 1999] gebruikt. Dit model heeft als voordeel dat het zowel ruimtelijk verdeeld als statistisch toegepast kan worden. In dit voorbeeld werd het model op de statistische manier toegepast. Als assimilatiealgoritme werd statistische correctie gekozen. Het model werd toegepast op het stroomgebied van de Zwalmbeek, waarvan Figuur 2 een overzicht geeft, op de periode van 1994 tot en met 1998. Figuur 3 geeft een voorbeeld van de invloed van de assimilatie van het oppervlakkig bodemvochtgehalte op de gemodelleerde afvoerpieken. Pauwels et al. [2002] beschrijven de resultaten in meer detail. Het algemeen besluit van deze studie was dat het mogelijk is om afvoervoorspellingen te optimaliseren door middel van de assimilatie van afstands-waargenomen oppervlakkige bodemvochtwaarden.

Figuur 2. Het stroomgebied van de Zwalmbeek en de verschillende deelstroomgebieden.



Figuur 3. Invloed van de assimilatie van afstandswaargenomen bodemvocht op gemodelleerde afvoerpieken.



Mogelijke toepassingen in Vlaanderen

Het potentieel gebruik van data-assimilatie in Vlaanderen is zeker niet beperkt tot het optimaliseren van afvoervoorspelling gebruik makend van afstandswaargenomen bodemvocht. Een eerste mogelijke toepassing is het geïntegreerd gebruik van radarteledetectie en gecombineerd hydrologisch/hydraulisch modelleren. De mogelijkheid tot het gebruik van afstandswaarnemingen om overstromende gebieden in kaart te brengen werd reeds aangetoond. De locatie van deze gebieden kan ook gemodelleerd worden door hydraulische modellen. Omwille van dezelfde redenen die gelden voor hydrologische modellen zijn de resultaten van deze modellen ook nooit perfect. Data-assimilatieschemas kunnen dus ontwikkeld worden voor gekoppelde hydrologische en hydraulische modellen, niet alleen om afvoerpieken en overstromingslocaties zo goed mogelijk te voorspellen, maar ook om schadebeperkingsmaatregelen uit te voeren, enz.

Een tweede mogelijke toepassing is het ontwerpen van data-assimilatieschemas voor de operationele bekkenmodellen. Deze maken gebruik van een zeer eenvoudig conceptueel hydrologisch model, meer bepaald het Probability Distributed Model (PDM). Het oppervlakkig bodemvochtgehalte is hier geen toestandsvariabele, waardoor het weinig zin heeft om afstandswaargenomen bodemvochtgehalten in dit model te assimileren. Echter kunnen assimilatieschemas ontwikkeld worden om afvoertijdreeksen uit het verleden te gebruiken om de gemodelleerde toestandsvariabelen aan te passen, waardoor afvoervoorspellingen geoptimaliseerd kunnen worden. De mogelijkheid tot het assimileren van afvoertijdreeksen in conceptuele hydrologische modellen werd reeds in de jaren 70 gedemonstreerd [Wood, 1978], maar deze schemas kunnen verder gemoderniseerd en ver-

beterd worden door de grotere beschikbare rekenkracht.

Besluiten

Het potentieel gebruik van data-assimilatie voor waterbeheersdoeleinden werd aan de hand van een praktisch voorbeeld aangetoond. Door het beschikbaar worden van steeds meer rekenkracht is data-assimilatie een van de mogelijke technieken die kan aangewend worden bij het operationeel waterbeheer in Vlaanderen. Twee mogelijke toepassingen werden gegeven, die slechts een fractie zijn van de mogelijke toepassing van deze techniek voor het integraal waterbeleid in Vlaanderen.

Referenties

- Hoeben, R. en P.A. Troch, Assimilation of active microwave observation data for soil moisture profile estimation, *Water Resources Research*, 36(10), 2805-2819, 2000.
- Houser, P.R., W.J. Shuttleworth, J.S. Famiglietti, H.V. Gupta, K.H. Syed en D.C. Goodrich, Integration of soil moisture remote sensing and hydrological modeling using data assimilation, *Water Resources Research*, 34(12), 3405-3420, 1998.
- Pauwels, V.R.N. en E.F. Wood, A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes, 1, Model improvements, *Journal of Geophysical Research*, 104(D22), 27811-27882, 1999.
- Pauwels, V.R.N., R. Hoeben, N.E.C. Verhoest, F.P. De Troch en P.A. Troch, Improvement of TOPLATS-based discharge predictions through assimilation of ERS-based remotely sensed soil moisture values, *Hydrological Processes*, 16(5), 995-1013, 2002.
- Penman, H.L., Weather, plant and soil factors in hydrology, *Weather*, 16, 207-219, 1961.
- Wood, E.F., An application of Kalman filtering to river flow forecasting, in: C.-L. Chiu (editor), *Applications of Kalman filter to hydrology, hydraulics, and water resources*, Proceedings of AGU Chapman conference held at the University of Pittsburg, May 22-24, 1978, Stochastics Hydraulics Program, Department of Civil Engineering, University of Pittsburg, Pittsburg, PA 15261, 385-407, 1978.

*Valentijn R.N. Pauwels,
Gabriëlle J.M. De Lannoy en
Niko E.C. Verhoest*

*Corresponderende auteur:
Valentijn Pauwels
Professor
Laboratorium voor Hydrologie en Waterbeheer
Universiteit Gent
Coupure links 653
9000 Gent
e-mail : Valentijn.Pauwels@UGent.be
Tel. + 32 - 9 - 264 61 35
Fax + 32 - 9 - 264 62 36*

Onzekerheden bij de Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse voor de Actualisatie van het Sigmaplan en aanbevelingen voor verfijning van de beschikbare methodes

In het kader van de Actualisatie van het Sigmaplan is een kosten-baten analyse uitgevoerd om het optimale maatregelenpakket te bepalen. Om de veiligheidsbaten door vermeden overstromingsrisico in te schatten, werd gebruik gemaakt van een door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde (risico)methode. Bij de uitvoering van de kosten-batenanalyse zijn keuzes gemaakt voor een groot aantal parameters waarop onzekerheden rusten. Het inschatten van risico's of baten van maatregelen is altijd omgeven met veel onzekerheid, zodat de grote uitdaging voor wetenschap en beleid erin bestaat om gegeven deze onzekerheid de kans op foute beleidsbeslissingen te minimaliseren. Hiertoe is onzekerheids- en sensitiviteitsanalyse onontbeerlijk. Ten eerste geeft zij aan welke parameters de grootste impact hebben op de resultaten en waar de prioriteiten liggen voor verder onderzoek. Ten tweede kan men de robuustheid van de conclusies van de kosten-batenanalyse toetsen.

Onderzochte parameters zijn o.a. de bresvorming, de risico-formule en de zeespiegelstijging. Bresvorming en zeespiegelstijging blijken parameters te zijn die een grote invloed op de veiligheidsbaten kunnen hebben. Aanslibbing van GGG's (Gecontroleerd Gereduceerd Getijgebied) en de kruinhoogte van de overloopdijken daarentegen hebben een kleine invloed.

De sensitiviteitsanalyse toonde aan dat de onzekerheid op de inschatting van de baten de onderlinge rangschikking van de verschillende alternatieven niet verandert zodat ongeacht de keuze van de parameters een gerichte combinatie van dijkverhoging en overstromingsgebieden de beste kosten-baten verhouding heeft. Verder zijn voor de meest rendabele projecten de baten steeds groter dan de kosten, en is er enkel de onzekerheid op de terugverdientijd. Tot slot worden in het artikel nog een aantal aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek.

1 Inleiding

Het vroegere Sigmaplan is opgesteld na de overstromingen in Ruisbroek van 1976 en wou het Zeescheldebekken beschermen tegen stormvloed, met een vast ontwerpcriterium (T10000). Dit Sigmaplan omvatte toen de verhoging van de dijken, de aanleg van 12 GOG's (Gecontroleerde Overstromingsgebieden) en de aanleg van een SVK (Stormvloedkering) te Oosterweel. Momenteel is reeds een groot deel van deze dijkverhogingen gerealiseerd en is het laatste van de 12 overstromingsgebieden in aanleg. De stormvloedkering is echter nooit gerealiseerd. Wegens de veranderende omstandigheden in de laatste 25 jaar drong een actualisatie van dit Sigmaplan zich op. Deze actualisatie werd uitgevoerd volgens de nieuwste principes inzake integraal waterbeheer, om zo natuur en veiligheid maximaal te combineren. Uitgangspunt voor het vernieuwde Sigmaplan was een risicobenadering, waarbij niet overal dezelfde beveiliging tegen overstromingen geboden wordt. Concreet komt het er op neer dat gebieden waar de risico's nu klein zijn minder beveiligd worden dan gebieden waar de risico's groot zijn.

Om deze nieuwe benadering uit te werken werd een kosten-baten analyse uitgevoerd. Hierbij werden de kosten van maatregelen of sets van maatregelen vergeleken met de baten, grotendeels veiligheidsbaten als gevolg van vermeden overstromingsrisico's.

Om de veiligheidsbaten door vermeden overstromingsrisico te bepalen werd gebruik gemaakt

van een door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde (risico)methode [Vanneuville et al., 2002]. Deze methode bestaat uit 4 grote stappen:

- Het bepalen van de terugkeerperiode van extreme gebeurtenissen op basis van een doorgedreven statistische analyse van lange tijdreeksen;
- Het bepalen van de overstromingskaarten met behulp van het concept composietrandvoorwaarden, die afgeleid worden vanuit de statistische analyse;
- Het bepalen van de schade en het verwacht aantal slachtoffers in de overstroomde gebieden;
- Het bepalen van het risico uit de kans van voorkomen van extreme gebeurtenissen en de hierdoor ontstane schade.

De eerste twee stappen zijn gebaseerd op nieuwe methoden ontwikkeld aan de K.U.Leuven [Willems et al., 2000].

Via een stapsgewijze optimalisatie werd dan een optimale combinatie van maatregelen bekomen. Kenmerkend voor deze optimale combinatie is een relatief beperkte oppervlakte aan nieuwe overstromingsgebieden die samen met het verhogen van de dijken op linker- en rechteroever leiden tot een zeer goede kosten-batenverhouding. Deze overstromingsgebieden zijn verspreid over de volledige Zeeschelde maar liggen meestal dicht bij zones waar veel schade kan voorkomen.

Bij de uitvoering van de kosten-batenanalyse zijn keuzes gemaakt voor een groot aantal parameters waarop onzekerheden rusten. Een gevoeligheidsanalyse laat toe om de invloed van onzekerheden op de resultaten te evalueren. Onderzochte parameters zijn zeespiegelstijging, bresvorming, aanslibbing van GGG's (gecontroleerd gereduceerd getijdegebied, dit zijn overstromingsgebieden die op een gecontroleerde manier via in- en uitwateringsconstructies dagelijks aan het getij worden blootgesteld), hoogte van de overloopp dijken en de risicoformule.

2 Invloed zeespiegelstijging

Om de kosten en baten van het optimale maatregelenpakket te bepalen werd reeds een verwachte zeespiegelstijging van 60 cm tegen 2100 mee in rekening gebracht. Vermits hierop een grote onzekerheid rust werden de veiligheidsbaten bepaald van zeespiegelstijgingen variërend tussen 0 en 120 cm tegen 2100 (zie Tabel 1). Hiervoor gebeurden geen nieuwe simulaties, maar werden de effecten van een zeespiegelstijging verschoven in de tijd. Zo worden bij een zeespiegelstijging van 120 cm tegen 2100 de gesimuleerde veiligheidsbaten reeds in 2061 gerealiseerd. Het exponentiële verloop van de zeespiegelstijging tot 2100 werd benaderd door in het standaard scenario te veronderstellen dat de zeespiegel stijgt met 22 cm in 2050 en 60 cm in 2100 of in het hoog scenario met 44 cm in 2050 en 120 cm in 2100.

Wanneer verondersteld wordt dat er tegen 2100 geen zeespiegelstijging optreedt, dan dalen de totale baten drastisch, of worden zelfs negatief, wat betekent dat het project minder of niet meer rendabel wordt. Indien er zich daarentegen een zeespiegelstijging van 120 cm zou voordoen, dan verdubbelen de totale baten bijna. De zeespiegels-

tijging heeft dus een belangrijke invloed op de veiligheidsbaten.

3 Invloed bresvorming

Het Zeescheldebekken wordt gekenmerkt door hoge dijken met een laag achterland. In normale omstandigheden staan de hoogwaterpeilen reeds hoger dan een groot deel van het achterland. Bij stormvloedomstandigheden kan naast overtopping van de dijken het falen van de dijken, met als gevolg dijkdoorbraken, een belangrijke oorzaak van overstromingen en schade zijn.

Bij het bepalen van de optimale oplossing werd daarom reeds rekening gehouden met het ontstaan van dijkdoorbraken en de daaruit volgende overstromingen en schade.

Op een relatief eenvoudige conceptuele manier werd met de beschikbare gegevens bepaald waar er zich bressen zouden kunnen voordoen in het studiegebied. Op deze locaties werden dan in het hydrodynamisch model modeleenheden ingebouwd die dit kunnen simuleren. Vanaf het moment dat het waterpeil op die locaties een bepaalde drempelwaarde overschrijdt, ontstaat er een dijkdoorbraak.

Om de invloed van bressen op de hydraulische berekeningen en de resulterende overstromingsschade te evalueren werden twee types wijzigingen aangebracht in het model. Een eerste type betrof een wijziging van het aantal potentiële bressen. Het tweede type had betrekking op de modelparameters van individuele bressen.

Bij de evaluatie van de impact van de breslocaties werden twee varianten onderzocht. In de eerste variant werden alle bressen uitgeschakeld ("zonder bressen"). In de tweede variant werden enkel de bressen in de omgeving van Hamme, die verantwoordelijk zijn voor een belangrijk deel van de totale overstromingsschade, uitgeschakeld ("zonder bressen te Hamme"). Om de invloed van

Tabel 1: Overzicht kosten en baten voor verschillende aannames gemiddelde zeespiegelstijging voor het optimale maatregelenpakket

Zeespiegelstijging 2100 t.o.v. 2000	0 cm	30 cm	60 cm (basis)	90 cm	120 cm
Geactualiseerde totale kosten	131,71	131,71	131,71	131,71	131,71
Geactualiseerde veiligheidsbaten tot 2100	138,13	437,44	736,75	1036,05	1335,36
Andere effecten tot 2100					
landbouw	-12,37	-12,37	-12,37	-12,37	-12,37
zicht omwonenden	-5,18	-5,18	-5,18	-5,18	-5,18
recreatie	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78
Totale netto geactualiseerde baten tot 2100	-2,35	296,96	596,26	895,57	1194,88
Terugverdientijd (jaar)	92	24	16	12	10
Discontovoet van 4%, gemiddelde economisch groei					

individuele bresparameters na te gaan werden wijzigingen aangebracht in het waterpeil waarbij de bres ontstaat, de maximale diepte van de bres, de breedte van de bres of in een combinatie van meerdere eigenschappen.

In de standaard berekeningen is het waterpeil waarbij een bres ontstaat ("failure level") afhankelijk van de locatie en van de beschouwde tijdshorizon (2000 of 2100). Naargelang de situatie start de bresvorming wanneer het waterpeil zich 5 tot 35 cm onder het kruinpeil van de dijk bevindt. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van deze keuze van waterpeilen wordt verwezen naar IMDC-RA-Vito [2005b]. Om de invloed van het gekozen peil in te schatten, werden alle peilen op uniforme wijze met 25 cm verlaagd.

Bij de vroeger uitgevoerde analyses werd de maximale diepte van een bres ("final bottom level") gelijkgesteld aan de hoogte van het maaiveld in het overstromde gebied. In Nederlandse studies ten behoeve van de MKBA Ontwikkelingsschets 2010 voor ProSes werd echter een maximale diepte van 5 m onder het maaiveld toegepast [HKV, 2004]. Dit betekent dat wordt verondersteld dat de bressen 5 meter dieper kunnen worden dan het maaiveld van de gebieden achter de dijk. Fysisch stemt dit overeen met de vorming van een wiel. In eerste instantie werd het toelaatbare bodempeil van alle bressen met 5 m verlaagd. Uit de resultaten bleek evenwel dat een aantal bressen nog steeds erodeerde tot aan de maximaal toegelaten diepte. Om het effect van ongelimiteerde dieptegroei te kunnen nagaan, werd ook nog een tweede reeks simulaties uitgevoerd. Hierbij werd het toelaatbare bodempeil van alle bressen met 20 m verlaagd. Daardoor werd dit peil lager dan het minimale bodempeil in de

Schelde zelf., om ervoor te zorgen dat de modellen nooit aan deze limiet zouden geraken.

De verschillende varianten werden doorgerekend voor het optimale geactualiseerde Sigmaplan. Voor de belangrijkste varianten werd ook de corresponderende variant van het nulalternatief¹ doorgerekend om de invloed van de variant op de economische analyse te kunnen evalueren. Tabel 2 toont de resultaten voor deze gevoeligheidsanalyse voor de varianten die de meeste invloed hadden op de schade. Hieruit blijkt:

- dat de resultaten met enkel overloop (zonder bresvorming) wijzen op een veel lagere veiligheidsbaat. Met andere woorden, als alle dijken aan overloop zouden weerstaan zonder bresvorming, dan is de netto baat van het optimale geactualiseerde Sigmaplan duidelijk lager. Dit komt omdat, zoals hoger beschreven, er ook veel minder schade optreedt in het nulalternatief. De terugverdientijd blijft maar net aanvaardbaar, want het plan verdient zich net niet terug in het "worst case" scenario.
- dat de economische rendabiliteit van het optimale geactualiseerde Sigmaplan niet afhankelijk is van al dan niet bresvorming te Hamme;
- dat, als de dijken zwakker zijn dan vooropgesteld in de basisberekeningen, het optimale geactualiseerde Sigmaplan uiteraard nog meer verantwoord is. In de basisberekeningen werd er immers van uit gegaan, dat de dijken blijven

¹ Het nulalternatief omvat de maatregelen die tot het reeds vastgelegde beleid behoren. In het huidige geval bestaat het nulalternatief uit een verdere afwerking van het oorspronkelijke Sigmaplan, met uitzondering van de stormvloedkering ter hoogte van Oosterweel.

Tabel 2: Overzicht kosten en baten voor verschillende scenario's bresvorming Sigmaplan 2

Scenario	Basis	Geen bressen	Geen bressen Hamme	Bressen -25 cm	Bressen diep
Geactualiseerde totale kosten	131,71	131,71	131,71	131,71	131,71
Geactualiseerde veiligheidsbaat tot 2100	736,75	266,28	719,81	1434,41	1186,16
Andere effecten tot 2100					
landbouw	-12,37	-12,37	-12,37	-12,37	-12,37
zicht omwonenden	-5,18	-5,18	-5,18	-5,18	-5,18
recreatie	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78
Totale netto geactualiseerde baten tot 2100	596,26	125,80	579,33	1293,93	1045,67
Terugverdientijd (jaar)	16	45	16	9	9
Terugverdientijd "worst case" (jaar)	45	/	52	20	19
Basisaannames: discontovoet van 4%, gemiddelde economisch groei, zeespiegel stijgt 60 cm in 100 jaar "Worst case": discontovoet van 7%, gemiddelde economische groei, zeespiegel stijgt 30 cm in 100 jaar					

weerstaan zonder bresvorming zelfs bij waterstanden binnen de "waakhoogte" van 50 cm onder de dijkkruin (vermits de bressen anno 2000 verondersteld worden te ontstaan bij waterpeilen vanaf 5 tot 25 cm onder de kruin). Deze aanname is conservatief voor het evalueren van de investeringen voor het nieuwe Sigmaplan, maar is dit uiteraard niet met betrekking tot het garanderen van veiligheid tegen overstromingen.

4 Aanslibbing GGG's

Wanneer de geplande overstromingsgebieden ingericht zouden worden als GGG, zullen ze onderhevig worden aan geleidelijke aanslibbing. Momenteel zijn hierover weinig concrete gegevens beschikbaar. Op basis van expert-inschatting is besloten om voor deze gevoeligheidsanalyse uit te gaan van een aanslibbing van 1 cm per jaar. Dit kan leiden tot een totale slibafzetting van ongeveer 1 m tegen het jaar 2100. Een dergelijke aanslibbing zal aanleiding geven tot een geleidelijke afname van het bergend vermogen van de overstromingsgebieden en bijgevolg ook tot een geleidelijke afname van de veiligheidsbaten.

Om de grootteorde van deze effecten te kunnen inschatten, werd een controleberekening met aangeslibde overstromingsgebieden uitgevoerd. Ook werd getest wat de invloed van 1 m aanslibbing zou zijn in de huidige omstandigheden. Er werd verder verondersteld dat door oordeelkundige plaatsing, onderhoud en controle van de sluizen, aanslibbing de werking van de sluizen niet verstoort. Onder deze omstandigheden geeft de gesimuleerde aanslibbing aanleiding tot een totale daling van de veiligheidsbaten van slechts 2%.

5 Hoogte overlooppdijken

Voor het uitwerken van het optimale geactualiseerde Sigmaplan zijn de kruinhoogtes van de overlooppdijken voor de GOG's gekozen op basis van de kruinhoogtes van de reeds in werking zijnde gecontroleerde overstromingsgebieden en op basis van de geplande kruinhoogtes voor KBR (het gecontroleerde overstromingsgebied van Kruibeke-Bazel-Rupelmonde).

De keuze van de kruinhoogtes van de overlooppdijken werd in eerste instantie bepaald door de doelstelling om een maximale bescherming tegen overstroming te garanderen, dus om een maximale geactualiseerde baat (berekend op basis van vermeden risico's in het invloedsgebied van de GOG's) te garanderen.

Overwegingen in verband met natuur en bodemgebruik (sommige GOG's frequenter gebruiken dan andere, wat een andere invulling toelaat), werden hier buiten beschouwing gelaten, maar kunnen in de praktijk ook een rol spelen

In het voorstel voor het optimale geactualiseerde Sigmaplan werd een combinatie van dijkhoogtes van 6.8 m TAW in de stroomafwaartse gebieden, 6.5 en 6.3 m TAW in de meer opwaartse gebieden gebruikt. Dit komt overeen met gemiddelde frequenties van overstromen van ongeveer één- of tweemaal per jaar of om de 2 jaar. Een verlaging van al de overlooppdijken tot 6.3 m TAW, waardoor gebieden frequenter overstromen (maar ook sneller of te vroeg gevuld kunnen zijn) levert een marginale extra veiligheidsbaat op (+1%). Het verhogen van de dijkhoogtes tot 7.5 m TAW zorgt ervoor dat de overstromingsgebieden slechts vollopen bij stormen met hogere terugkeerperiodes. Dit zorgt echter voor een verlaging van de globale veiligheidsbaat met 7%. Dit komt omdat ook kleinere terugkeerperiodes (kleiner dan ongeveer 50 jaar) een belangrijke invloed hebben op de veiligheidsbaten. Bij hogere overlooppdijken treden de overstromingsgebieden bij lage terugkeerperiodes niet in werking en worden de waterpeilen niet omlaag getrokken langs de rivier. Er wordt dus minder schade vermeden waardoor ook de veiligheidsbaten lager zijn.

6 Risicoformule

Risico is gelijk aan kans van voorkomen van een bepaalde gebeurtenis vermenigvuldigd met de schade die bij deze gebeurtenis hoort en dit samengesteld voor het geheel van kansen van voorkomen. Dit kan als volgt geschreven worden:

$$R = \int_{n=0}^{+\infty} f(n) \cdot S(n) dn$$

waarbij:

R = risico

S = de schade die een storm aanricht

n = terugkeerperiode

$f(n)$ = frequentiedichtheid van een storm met terugkeerperiode n

Het is uiteraard niet mogelijk voor iedere mogelijke kans of terugkeerperiode de corresponderende schade te berekenen. Met behulp van een discrete benadering is het mogelijk om op basis van schadegegevens voor enkele terugkeerperiodes een inschatting te maken van het totale risico. Hiertoe gebeuren aannames omtrent de schade van de ontbrekende periodes en omtrent de frequentiedichtheid.

Vertrekkend vanuit de schade voor terugkeerperiodes van 1, 2, 5, 10, 100, 500, 1000, 2500, 4000 en 10.000 jaar is voor alle berekeningen verondersteld dat de schade lineair toeneemt tussen de terugkeerperiodes en is voor de frequentiedichtheid volgende trapsgewijze benadering uit Vanneuville et al. 2002 gebruikt:

$$Risiko = \frac{1}{1} S_1 + \frac{1}{2} (S_2 - S_1) + \frac{\frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}}{5-2} (S_5 - S_2) + \frac{\frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9} + \frac{1}{10}}{10-5} (S_{10} - S_5) + ..$$

Hierbij is S_i de schade bij een gebeurtenis met een kans op voorkomen van $1/i$ per jaar.

Een andere mogelijke benadering is de lineaire frequentiebenadering, waarbij de frequentiedichtheid van ontbrekende periodes bepaald wordt op basis van lineaire interpolatie. Een derde benadering is de continue frequentiebenadering. In deze benadering wordt de integraal over $f(n)$ exact berekend. Naast deze twee verbeterde benaderingen zijn ook onder- en bovengrenzen bepaald om de grenzen van de risicobenadering te verkennen. In een ondergrens-benadering wordt verondersteld dat de veiligheidsbaat gelijk blijft voor alle terugkeerperiodes groter dan een gesimuleerde terugkeerperiode en dit tot de volgende gesimuleerde terugkeerperiode. In een bovengrensbepaarding wordt het omgekeerde verondersteld. De veiligheidsbaten van terugkeerperiodes kleiner dan een gesimuleerde periode worden gelijkgesteld en dit tot de volgende kleinere gesimuleerde periode. Het verschil in de gehanteerde risicoformules wordt grafisch voorgesteld in figuur 2.

Het verschil tussen de verschillende benaderingen bij de risicoformule is klein. Vooral voor de kleinere terugkeerperiodes is er een verschil, maar de totale veiligheidsbaat is vergelijkbaar. Afhankelijk van welke formule gebruikt wordt, is er een maximaal verschil tot 20%. De onder- en bovengrensbepaarding tonen dat ook in het meest extreme geval de veiligheidsbaten opwegen tegen de kosten.

7 Concluesies

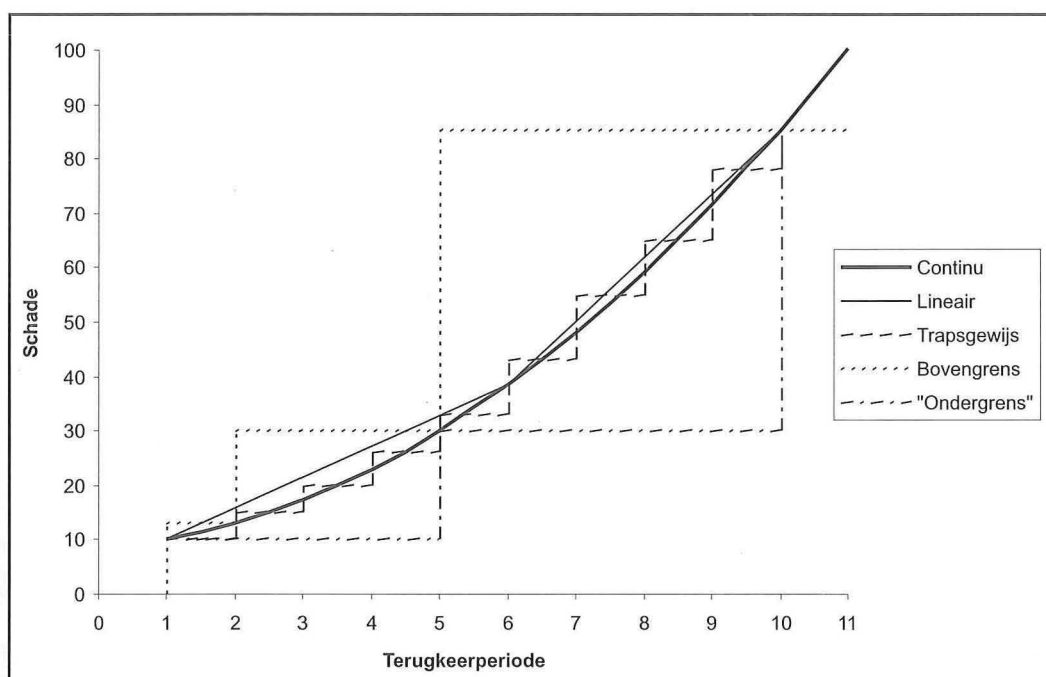
Figuur 3 geeft de resultaten die in de bovenstaande hoofdstukken besproken zijn, grafisch weer. De horizontale lijnen op de figuur komen overeen met de veiligheidsbaat van het optimale geactualiseerde Sigmaplan en met de kostprijs van dit plan.

Uit de figuur blijkt duidelijk dat geen enkele factor de veiligheidsbaten lager doet worden dan de kostprijs. Dit betekent dat de baten altijd groter zijn dan de kosten.

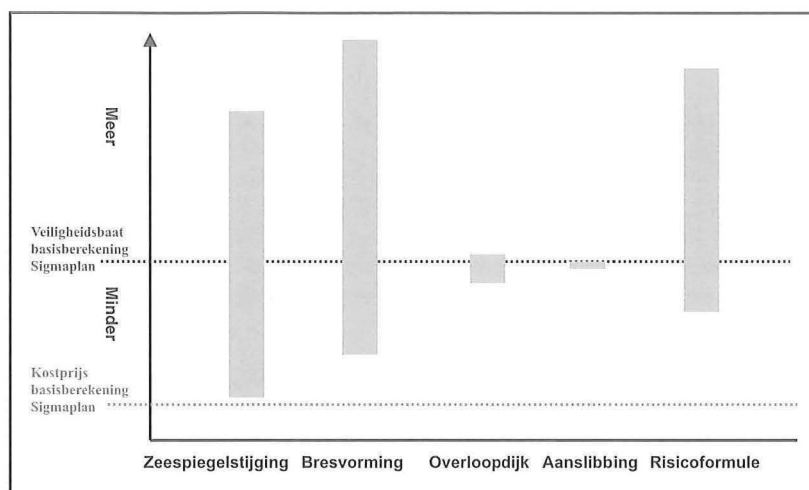
Zeespiegelstijging, bresvorming en de gebruikte risicoformule kunnen een grote invloed hebben op de veiligheidsbaten. De hoogte van de overlooppdijk en de aanslibbing van GGG's daarentegen hebben een kleine invloed op de veiligheidsbaten.

Het inschatten van risico's of baten van maatregelen is altijd omgeven met veel onzekerheid, zodat de grote uitdaging voor wetenschap en beleid erin bestaat om, gegeven deze onzekerheid, de kans op foute beleidsbeslissingen te minimaliseren. Hiertoe is onzekerheids- en sensitiviteitsanalyse onontbeerlijk. Ten eerste geeft zij aan welke parameters de grootste impact hebben op de resultaten en waar de prioriteiten liggen voor verder onderzoek. Ten tweede kan men de robuustheid van de conclusies van de kostenbatenanalyse toetsen.

Figuur 2: Grafische voorstelling verschillende risicoformules



Figuur 3: Vergelijking veiligheidsbaten verschillende onderzochte invloedsfactoren



Voor het gekozen optimale alternatief zijn de baten steeds groter dan de kosten, en is er enkel de onzekerheid op de terugverdientijd. Een gerichte combinatie van dijkverhoging en overstromingsgebieden geeft steeds de beste kosten-batenverhouding. Meer details over de voorgestelde studie kunnen gevonden worden in RA-IMDC-Vito [2005a].

Op basis van de bevindingen bij de studie kunnen enkele aanbevelingen voor verder onderzoek worden geformuleerd. De in deze studie gevolgde risicomethode heeft zeker een toegevoegde waarde voor beleidsondersteuning, maar dient met grote omzichtigheid toegepast te worden wat de absolute waarde van de risicoschatting betreft. Het testen van de robuustheid van de volgorde in scenario's in een sensitiviteitsanalyse is hierbij dan ook essentieel dan de absolute waarden van kosten en baten. De sensitiviteitsanalyse toont aan dat de faalmechanismen van dijken, de toegepaste klimaatverandering (enkel stormtijden), de schadefuncties en de berekeningsmethode van het risico uit de schade grote impact kunnen hebben op deze absolute waarden. Alhoewel deze factoren in dit geval geen impact hadden op de volgorde van de scenario's kan dit in de toekomst bij andere voorbeelden wel het geval zijn. Verder onderzoek in deze thema's om de onzekerheid van deze parameters te verminderen, is dan ook belangrijk.

Referenties

HKV, (2004), Casestudies voor overstromingschade in dijkkringgebieden 30, 31 en 32, Rapport in opdracht van Protes

RA-IMDC-Vito, (2005a), Maatschappelijke Kosten Baten Analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan – Faserapport 1: Composietrandvoorwaarden, I/RA/14082/03055/BND, Rapport in opdracht van Waterwegen en Zeekanaal, Afdeling Zeeschelde

RA-IMDC-Vito, (2005b), Maatschappelijke Kosten Baten Analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan – Faserapport 2: Nulalternatief: waterstanden, overstromingskaarten, schade, slachtoffers en risico, I/RA/14082/04017/SME, Rapport in opdracht van Waterwegen en Zeekanaal, Afdeling Zeeschelde

RA-IMDC-Vito, (2005c), Maatschappelijke Kosten Baten Analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan – Faserapport 4: Lokale optimalisatie van dijkverhoging en overstromingsgebieden, I/RA/14082/04017/SME, Rapport in opdracht van Waterwegen en Zeekanaal, Afdeling Zeeschelde

RA-IMDC-Vito, (2005d), Maatschappelijke Kosten Baten Analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan – Faserapport 5: Gevoeligsanalyse op de optimale oplossing, I/RA/14082/05004/BND, Rapport in opdracht van Waterwegen en Zeekanaal, Afdeling Zeeschelde

Vanneuville et al. (2002) - Risicobenadering bij waterbeheersingsplannen, Methodologie en case study Denderbekken, Rapport door Universiteit Gent in opdracht van van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, 2002

Willems P., Qvick, A., Vaes, G., Berlamont, J., Christiaens, K., Feyen, J., (2000), Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen, Rapport door K.U.Leuven in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, april 2000.

S. Smets¹, S. Broekx², D. Bulckaen¹, L. De Nocker², I. Liekens², J. Gauderis³, W. Dauwe⁴

¹International Marine and Dredging Consultants (IMDC), België

²Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek (VITO), België

³Resource Analysis (RA), België

⁴Waterwegen en Zeekanaal (W&Z), Afdeling Zeeschelde, België

Auteur:
Steven Smets
Ingenieur Adviseur
International Marine and Dredging Consultants (IMDC)
Wilrijkstraat 37-45
2140 Borgerhout
België
Tel: +32 3 270 92 95
Fax: +32 3 235 67 11

Gebruik van overstromingskaarten voor verschillende watergerelateerde beheers- en beleidsinstrumenten

In Vlaanderen maken verschillende overheidsinstanties overstromingskaarten. Ze worden voor verschillende toepassingen gebruikt.

De kaarten voor de verzekering tegen natuurrampen werden in 2006 goedgekeurd door de Federale Regering. Ze omvatten overstromingszones waarbinnen verzekeraars hoger kunnen tarifieren of dekking weigeren.

Elk nieuw vergunningsplichtig initiatief moet de Watertoets ondergaan. Als het schade veroorzaakt aan het watersysteem moet dit initiatief herbekeken worden. Voor het toepassen van de Watertoets zijn richtlijnen en kaarten opgesteld zoals een kaart met overstromingsgevoelige gebieden.

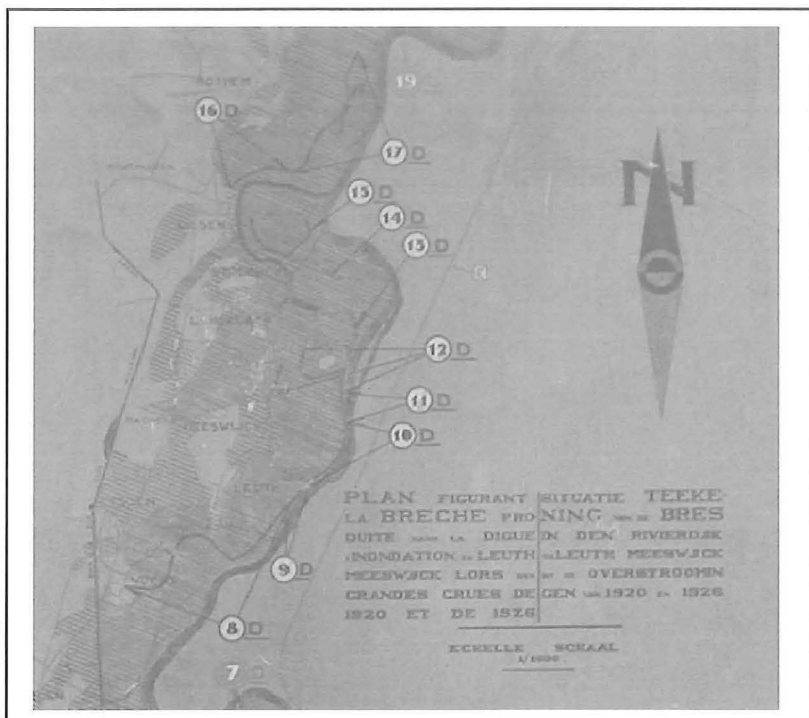
In de Vlaamse waterbeheersingsplannen kiest men nu voor beveiliging tegen schade in plaats van tegen historische overstromingen. Het Hydrologisch Informatiecentrum HIC ontwikkelde een methode die overstromingskans, -schade en -risico in kaart brengt. Die kaarten worden gebruikt bij de actualisatie van de waterbeheersingsplannen.

In Europa wordt een richtlijn voorbereid om overstromingsrisico's te verminderen en te beheren. De lidstaten maken daarvoor een afbakening van overstroombare gebieden en brengen de gevolgen van overstromingen in kaart. Vlaanderen heeft al verschillende kaarten beschikbaar. Dit artikel geeft een overzicht.

Overstromingskaarten – van alle tijden.

Het idee om kaarten op te maken van ondergelopen gebieden bij overstromingen is zeker niet nieuw. Dit blijkt bijvoorbeeld uit een oude kaart van overstromingen langs de Maas bij de Vlaams-Nederlandse grens in 1920 en 1926 (zie figuur 1).

Figuur 1: Overstromingen in 1920 en 1926 langs de Gemeenschappelijke Maas, kaart momenteel aanwezig bij NV De Scheepvaart.



Dergelijke kaarten bevatten immers een schat aan informatie voor de beheerders van de waterlopen. Welke gebieden kampten met problemen? Werden de beschikbare overstromingsgebieden wel benut? Een dergelijke kaart geeft bijgevolg een beeld van de betreffende rivier in overstromings-situaties.

Tegenwoordig worden overstromingskaarten veelvuldig gebruikt. Overheidsinstanties in Vlaanderen zoals het Waterbouwkundig Laboratorium, Afdeling Water en de provincies hebben dergelijke kaarten gemaakt. Daarbij worden verschillende technieken toegepast. Zo wordt er gebruik gemaakt van waarnemingen op het terrein bij overstromingen. Deze waarnemingen, ROG of Recent Overstroomde Gebieden genaamd, kunnen worden gecombineerd met het Digitaal HoogteModel (DHM) van Vlaanderen. Dit DHM bevat immers de hoogteligging van volledig Vlaanderen en dus ook van de overstroomde gebieden. Ook luchtfoto's en filmbeelden van de overstromingen worden gebruikt voor afbakening van de gebieden die onder water stonden. Een andere mogelijkheid is het gebruik van numerieke modellen van de rivieren. Dergelijke modellen vormen een soort digitale maquette van waterlopen en hun overstromingsgebieden. Ze kunnen bepaalde situaties in het verleden nabootsen en digitaal overstromingen simuleren. De resultaten kunnen ook omgezet worden tot kaarten met de afbakening van overstromingszones. De combinatie van overstromingsafbakeningen uit verschillende bronnen geeft een zo volledig mogelijk beeld voor Vlaanderen.

Overstromingskaarten worden gebruikt voor verschillende doeleinden, zoals de verzekering tegen natuurrampen, de Watertoets, de waterbeheersingsplannen en de Europese richtlijn inzake overstromingsrisico's. Verder in dit artikel wordt dieper ingegaan op het gebruik van de kaarten in de opgesomde toepassingsgebieden.

De vier hierboven opgesomde toepassingsgebieden zijn zeker niet de enige. Andere voorbeelden zijn projecten zoals Excimap (= Exchange Circle for Flood Risk Mapping waarbij technieken voor de opmaak van overstromings- en risicokaarten en voorbeelden van goede praktijk uit heel Europa gebundeld worden), Safecoast (=Interreg IIIB, opvolger van het project COMRisk waarbij overstromingsrisico's in de kustgebieden bekeken worden nu en in 2050 door rekening te houden met potentiële klimaatwijzigingen), scenario-berekeningen met numerieke modellen in het algemeen, overstromingskaarten als resultaat van voorspellingsmodellen,...

Daarnaast wordt ook actief gezocht naar nieuwe technieken voor het opstellen van overstromingskaarten. Eén van die technieken, die intussen al in praktijk is uitgevoerd, is het gedetailleerd in kaart brengen van overstromingen op een snelle manier, met behulp van digitale opnames vanuit een helikopter. Een belangrijk voordeel hierbij is het snel beschikbaar hebben van overstromingskaarten. Dergelijke informatie geeft immers belangrijke inzichten en overzichten tijdens wateroverlastproblemen.

Gebruik van overstromingskaarten voor de verzekering tegen natuurrampen.

De verzekering tegen natuurrampen, waarin ook overstromingen opgenomen zijn, werd in maart 2006 goedgekeurd door de federale regering.

Figuur 2: Overstromingen in het Denderbekken in december 2002 – januari 2003. Bron: W&Z Afdeling Bovenschelde.



Ze zit vervat in de brandverzekering.

Voor deze wet is een afbakening gemaakt van "de plaatsen die aan terugkerende en belangrijke overstromingen blootgesteld werden of blootgesteld kunnen worden". De criteria hierbij zijn dat de terugkeerperiode van overstroming kleiner is dan of gelijk is aan 25 jaar (een terugkeerperiode gelijk aan 25 jaar betekent dat de overstroming zich gemiddeld één keer in 25 jaar voordoet) en dat de overstromingsdiepte minstens 30cm bedraagt (waterdieptes kleiner dan 30cm worden voor deze kaarten buiten beschouwing gelaten).

De intekening van deze kaarten is gebeurd op basis van gebieden die in numerieke modellen als overstroomd ingetekend worden en aan de bovenstaande criteria voldoen. Voor aanvulling langs de waterlopen die niet gemodelleerd zijn, wordt gesteund op de informatie van de ROG-kaarten (met overstromingsinformatie vanaf 1988) gecombineerd met het DHM van Vlaanderen. In september 2006 keurde de Vlaamse Regering deze kaarten goed.

Binnen deze afgebakende zones zal de verzekerde meer betalen of kan de verzekeraar weigeren dekking tegen overstromingen te verlenen. Een tarifieringsbureau bepaalt de maximale tariefvoorwaarden. Diegenen die worden geweigerd door de verzekering kunnen tegen dat maximum tarief terecht bij het bureau.

Overstromingskaarten als informatiebron voor de Watertoets.

De Watertoets geeft nadere invulling aan het decreet Integraal Waterbeleid. Het is een instrument waaraan elk nieuw initiatief dat vergunningsplichtig is, moet onderworpen worden vooraleer een vergunning kan verleend worden.

Als uit de Watertoets blijkt dat het initiatief schadelijke effecten veroorzaakt door veranderingen in de toestand van het oppervlaktewater, het grondwater of de waterafhankelijke natuur, moeten er alternatieven of compenserende maatregelen gezocht worden. Men zal in de eerste plaats voorwaarden opleggen om de schade te vermijden of te beperken. Anders zullen de maatregelen gericht worden op het herstellen van schade. Indien in uitzonderlijke gevallen toch geen aanvaardbaar alternatief of remediëring mogelijk is, zal het initiatief geweigerd worden.

De toepassing van de Watertoets omvat 2 luiken: enerzijds de toepassing van de Watertoets door de vergunningverleners en anderzijds de adviesverlening door de betrokken waterbeheerders aan de beslissingsnemende overheid.

De Watertoets wordt toegepast met behulp van het Watertoetsinstrument. Dit bevat een procedure en richtlijnen om na te gaan of een initiatief de Watertoets doorstaat of dat er mogelijk schadelijke effecten kunnen optreden en een advies nuttig kan zijn. Een dergelijk advies bevat een beoordeling van het initiatief en een voorstel van

voorwaarden en maatregelen voor bijsturing. Binnen het Watertoetsinstrument wordt gebruik gemaakt van 7 Watertoetskaarten:

- Overstromingsgevoelige gebieden
- Waterloopbeheerders
- Infiltratiegevoelige bodems
- Grondwaterstromingsgevoelige gebieden
- Winterbedkaart
- Hellingenkaart
- Erosiegevoelige gebieden

De kaart met overstromingsgevoelige gebieden is ook gebaseerd op meerdere bronnen. Deze kaart bevat 2 onderdelen, namelijk de effectief overstromingsgevoelige gebieden en de mogelijk overstromingsgevoelige gebieden.

De effectief overstromingsgevoelige gebieden bevatten informatie uit de recent overstroomde gebieden gecombineerd met het DHM en uit de gemodelleerde overstromingsgebieden.

De mogelijk overstromingsgevoelige gebieden zijn gebaseerd op de van nature overstroombare gebieden, de potentiële overstromingsgebieden (= gebieden die als gecontroleerd overstromingsgebied zouden kunnen ingericht worden) en de mijnverzakkingsgebieden. Een aantal gebieden binnen deze zones werden uit de afbakening weggelaten. Voorbeelden hiervan zijn de op het gewestplan ingekleurde gebieden woongebied, openbaar nut, dienstverlening en bedrijven-terreinen. Ook in de als effectief overstromingsgevoelig aangeduide gebieden zijn deze zones geschrapt.

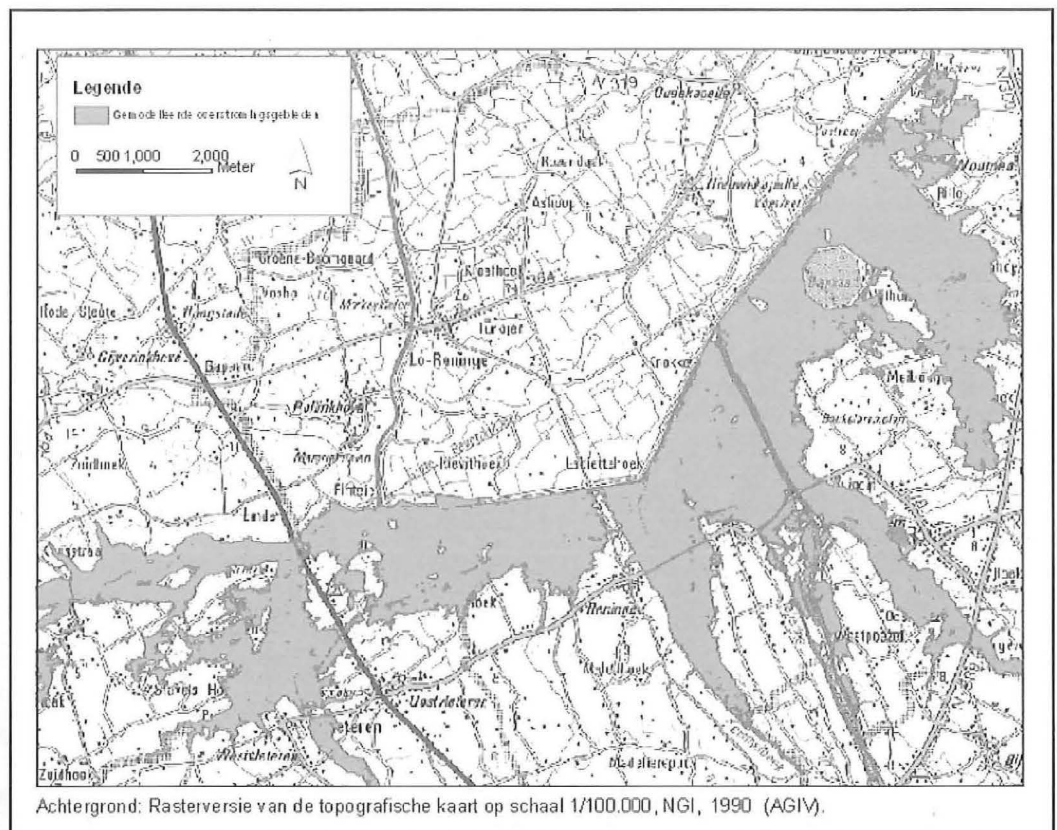
Figuur 3: voorbeeld van een overstromingskaart afgebakend met de numerieke modellen.

Waterbeheersingsplannen en het gebruik van overstromingskaarten.

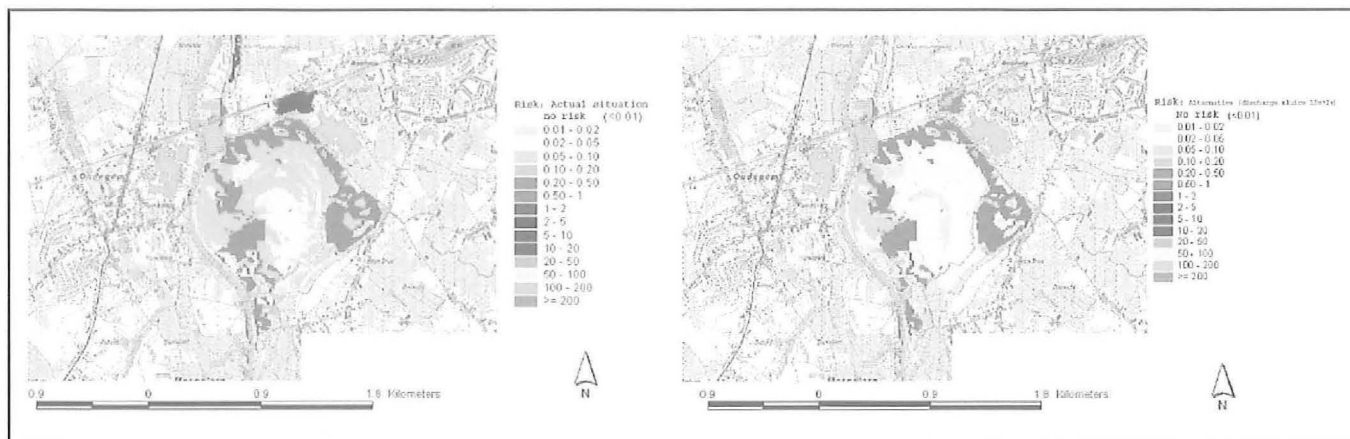
De waterbeheersingsplannen die vroeger werden opgesteld in Vlaanderen zijn gebaseerd op een beveiliging tegen historisch gekende hoge waterstanden ofwel op basis van buitenlandse waterbeheersingsplannen. Voorbeelden hiervan zijn het Sigmaplan en het Maasdijsplan.

Meer en meer beseft men echter dat hier een andere aanpak nodig is. Daarbij streeft men in het waterbeheer naar een beveiliging tegen overstromingsschade in plaats van tegen hoge waterstanden. Voor deze aanpak heeft het Hydrologisch Informatiecentrum (HIC) een methodiek ontwikkeld die gebaseerd is op overstromingskaarten gegenereerd door de numerieke modellen. Met behulp van deze modellen worden immers verschillende kaarten aangemaakt die overstromingen met bepaalde kans van voorkomen weergeven. Door de informatie uit deze kaarten te combineren met het landgebruik, kan per kaart de schade berekend worden die een dergelijke overstroming teweeg zou brengen. De schade en de kans van voorkomen van de verschillende kaarten samengevoegd leidt tot de berekening van een overstromingsrisico voor een bepaald gebied of een bepaald rivierbekken. Dit kan op kaart voorgesteld worden zodat bijvoorbeeld de veranderingen in risico als gevolg van een bepaalde ingreep tot uiting kunnen komen.

Op basis van overstromingsrisico's kan het beleid een economisch en maatschappelijk aanvaardbare veiligheidspolitiek uitwerken. Gebieden met hetzelfde overstromingsrisico krijgen in principe hetzelfde beschermingsniveau tegen een



Figuur 4: Voorbeeld van overstromingsrisicokaarten in het bekken van de Dender. Links: referentiesituatie, rechts: na uitvoering van een ingreep. (Achtergrond: rasterversie van de topografische kaart in kleur, 1:10 000, Nationaal Geografisch Instituut, 1991-2001, AGIV)



overstroming, waarbij wordt gekozen voor die maatregelen die de maatschappij het minste kosten. Hierbij gaat men op zoek naar een evenwicht tussen de kosten van infrastructuurwerken zoals dijken en de baten naar de veiligheid toe van dergelijke werken. Hierbij moeten ook de effecten op landbouw, recreatie, natuur en dergelijke beschouwd worden, evenals de terugbetalingstermijn en de onderhoudskosten van de infrastructuur.

Deze methodes en principes vormen de input, naast andere elementen zoals natuurwaarden, landschapswaardering, ... voor aanpassing van de huidige waterbeheersingsplannen. Zo werd bij de actualisatie van het Sigmaplan een maatschappelijke kosten-batenanalyse mee in rekening gebracht. Ook in het "Masterplan Veilige Kust" wordt gebruik gemaakt van deze aanpak.

Voorstel voor Europese richtlijn inzake overstromingsrisico's en overstromingskaarten

In de zomer van 2002, 2005 en in april 2006

Figuur 5: Dresden in de zomer van 2002, bron: F 58: Dresden, Durchgang des Hochwasserscheitels, 17.08. 2002, Elbe, Auteur: DDP



vonden belangrijke overstromingen plaats langs de Elbe en de Donau. De totale schade was telkens groot. Onder andere de stad Dresden had hier zwaar onder te lijden. Historische gebouwen, musea en woningen kwamen onder water.

Deze en andere overstromingen hebben de Europese Commissie aangezet om stappen te ondernemen. Onlangs raakte het Europees Parlement het eens over de "Proposal for European Flood Directive".

De goedkeuring door het Europees parlement en de Raad van Europa wordt in 2007 verwacht.

Men stelt dat overstromingen natuurverschijnselen zijn die niet kunnen worden voorkomen. Wel dragen sommige menselijke activiteiten en de klimaatverandering ertoe bij dat de kans op overstromingen en de omvang van de resulterende schade toenemen. Daarom heeft deze richtlijn als doel de risico's van overstromingen voor de mens, het milieu en de economie te verminderen en te beheren.

Voor wat betreft de aanpak zullen de lidstaten eerst een voorbereidende afbakening van de gebieden met mogelijk overstromingsrisico moeten maken. Deze wordt "voorlopige overstromingsrisico-beoordeling" genoemd en is verwacht tegen eind 2012. De nodige documenten hiervoor zijn onder meer beschrijvingen van overstromingen in het verleden met significante negatieve effecten die zich ook nog in de toekomst kunnen voordoen.

Tegen eind 2013 worden overstromingsgevaarkaarten en overstromingsrisicokaarten verwacht. De overstromingsgevaarkaarten moeten weergeven welke gebieden kunnen overstromen, de risicokaarten moeten een beeld geven van de potentiële negatieve gevolgen van overstromingen.

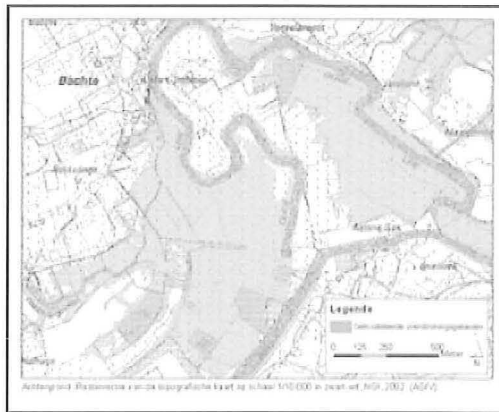
Eind 2015 verwacht men de overstromingsrisicobeheerplannen met aandacht voor vermindering van de potentiële negatieve gevolgen van overstromingen, rekening houdend met onder meer kosten en baten, berging, grondgebruik en dergelijke meer. Deze kaarten en plannen zullen

daarna elke 6 jaar worden herzien en eventueel aangepast aan de gewijzigde omstandigheden en inzichten. Vlaanderen heeft momenteel al verschillende van deze kaarten of instrumenten beschikbaar.

Conclusies

Overstromingskaarten, in verschillende vormen en vanuit verschillende bronnen, blijken een belangrijke toetssteen te zijn voor verdere acties omtrent waterlopen en overstromingen. In Vlaanderen is momenteel al veel kaartmateriaal aanwezig, vaak op maat gemaakt voor verschillende doeleinden. Daarnaast is ook het basisinstrumentarium zoals numerieke modellen, hoogtemodel, socio-economische gegevens veelal aanwezig, waardoor snel kaarten met nieuwe vereisten kunnen worden aangemaakt.

Figuur 6: voorbeeld van een overstromingskaart opgesteld met de numerieke modellen.



Referenties

Degans, H. et al. (2006). Waterhuishouding: Overstromingen in een wijzigende omgeving, in: Van Steertegem, M. (ed.), *Milieurapport Vlaanderen MIRA-T2006 Focusrapport*, Vlaamse Milieu-maatschappij & Lannoo Campus, Leuven, Hoofdstuk 6, p. 126-147.

Vlaamse Overheid, 2006, Risicozones overstrooming – begeleidende nota 29 augustus 2006

Nota aan de leden van de Vlaamse regering betreffende de wet van 17 september 2005 tot wijziging van de verzekering tegen natuurrampen, ontwerp van afbakening van risicozones overstrooming.

<http://www.civvlaanderen.be/watertoets.cgi?> Of www.watertoets.be (op datum van 7 maart 2007)

Watertoets – kaart met overstromingsgevoelige gebieden; toelichting bij de kaart met overstromingsgevoelige gebieden voor de watertoets.

<http://www.platformbuitengebied.be/sigmaplan.htm> (op datum van 6 maart 2007)

Europese Commissie, 2006, Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the assessment and management of floods, Brussel.

Europees parlement en de raad van de Europese Unie, 2006, Richtlijn 2006/.../EG van het Europees parlement en de raad over beoordeling en beheer van overstromingsrisico's.

<http://www.safecoast.org>

E. D'Haeseleer,
W. Vanneuville,
K. Van Eerdenbrugh,
F. Mostaert

Waterbouwkundig Laboratorium,
Berchemlei 115,
2140 Antwerpen

Contact:
Erika D'Haeseleer,
Waterbouwkundig Laboratorium,
Berchemlei 115, 2140 Borgerhout
Tel. 03/224.60.35, fax. 03/224.60.36,
erika.dhaeseleer@mow.vlaanderen.be

Innovatieve technieken om overstroming snel in kaart te brengen

Beheer van overstromingen door de Vlaamse Overheid vereist goede informatie over de locatie van overstromingsgevoelige gebieden. Het waterbeleid in Vlaanderen beschikt over computermodellen die het waterpeil van de rivieren onder hun beheer opvolgen en kunnen voorspellen. De modellen worden ondermeer gebruikt om overstromingen te simuleren en zo hun mogelijke geografische omvang te bepalen.

Het Vlaamse waterbeleid beschikt over een ruimtelijke databank betreffende overstromingen. In deze databank zijn alle overstroomde gebieden opgenomen vanaf 1988. De databank is opgebouwd op basis van de informatie die werd verstrekt door lokale autoriteiten, Vlaamse administraties en studiebureaus. Deze databank is cruciaal om een degelijk waterbeleid te kunnen voeren. Het is dan ook belangrijk om de bestaande modellen te valideren aan de hand van een goed gekende werkelijke waterlijn. Het is nu de bedoeling om de bestaande databank actueel te houden.

Om te kunnen beschikken over voldoende materiaal om de overstromingsmodellen te valideren en de overstromingsdatabank actueel te houden werd methodologisch onderzoek uitgevoerd. De eerste methodologie behandelt de detectie van overstromingen op basis van radarbeelden. Deze methodologie werd getest op ENVISAT/ASAR beelden (ruimtelijke resolutie van 30 meter en een pixelresolutie van 12.5 meter). De methodologie werd ontwikkeld in het kader van het Floodmap project. Dit project werd gefinancierd door Federaal Wetenschapsbeleid (DWTC) en kadert in het nationale remote sensing programma STEREO. Het project werd uitgevoerd door het Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen (AGIV) en de Koninklijke Militaire School, Signal and Image Centre (RMA-SIC) en het Vlaamse waterbeleid.

De tweede methodologie werd ontwikkeld om ook op grootschalig niveau heel nauwkeurig een waterlijn te detecteren. Deze methodologie steunt op beeldopnames gemaakt vanuit een helikopter op het moment van een overstroming.

In dit overzicht wordt eerst de methodologie op basis van de radarbeelden besproken. Vervolgens wordt de kartering van overstromingen op basis van luchtbeelden gemaakt vanuit een helikopter uiteengezet. Finaal wordt ook het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen voorgesteld dat werd opgesteld in opdracht van het waterbeleid als invoer voor debeschikbare overstromingsmodellen.

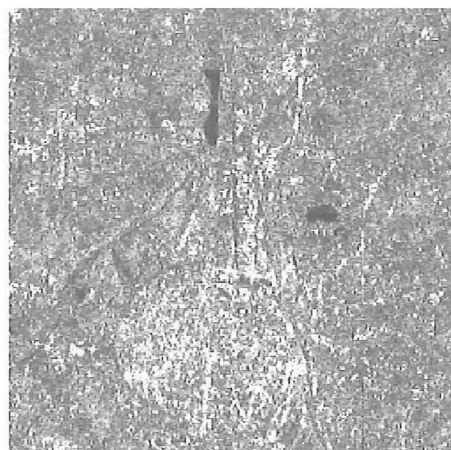
Overstromingskartering op basis van radarbeelden

Preprocessing

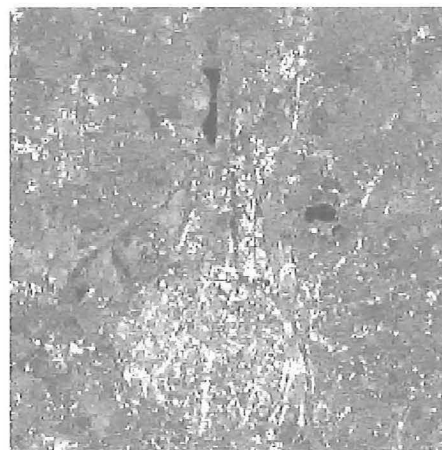
Alle SAR beelden zoals lidar, sonar, ultrasound, bevatten ruis of 'noise', ook 'speckle' genoemd. In een eerste fase wordt deze ruis onderdrukt om de kwaliteit van het beeld te verhogen (voorbeeld figuur 1).

Figuur 1: Het originele ASAR beeld voor (a) en na (b) de vermindering van het ruis of "speckle".

In een tweede fase werd de georeferentie van de beelden geoptimaliseerd. De ASAR beelden werden reeds ruwweg georeferereerd door de aanbieder van de beelden. Er werd een extra affine transformatie toegepast voor de juiste registratie van de beelden. Het ASAR beeld werd gegeoreferereerd op basis van 8 grondcontrolepunten die nauwkeurig werden bepaald op de topografische kaarten van het NGI. De grondcontrolepunten werden zo gekozen dat ze goed en duidelijk terug te vinden zijn zowel op het beeld-



(a)



(b)

materiaal als op de topografische kaart. Om de kwaliteit van de georeferentie te verduidelijken werd onderstaande figuur toegevoegd waarbij het straten-netwerk op het radarbeeld werd gelegd (figuur 2).

Figuur 2: kwaliteit van het georeferentieresultaat. Het straten-netwerk werd op het ASAR beeld gelegd ter vergelijking.



Overstromingskartering

In de meeste projecten worden overstromingen afgelijnd op basis van operationele interpretatie. De detectie van overstromingen op basis van radarbeelden gebeurde hier op basis van automatische extractietechnieken en -algoritmes. Om de overstromde gebieden op basis van het radarbeeld te detecteren werden twee technieken gebruikt, meer bepaald een pixel gebaseerde classificatietechniek en een object georiënteerde classificatietechniek. In volgende analyses wordt zowel het object georiënteerde algoritme als de actieve contour algoritme en de combinatie van beiden toegepast op de radarbeelden. Beide algoritmes zijn gebaseerd op het feit dat overstromde gebieden op radarbeelden als donkere vlekken worden geregistreerd. Dit komt doordat stilstaande wateroppervlaktes reageren als een spiegel: de invallende radarsignalen worden weg van de sensor weerkaatst en geven bijgevolg geen terugkerend signaal.

Object georiënteerde algoritme

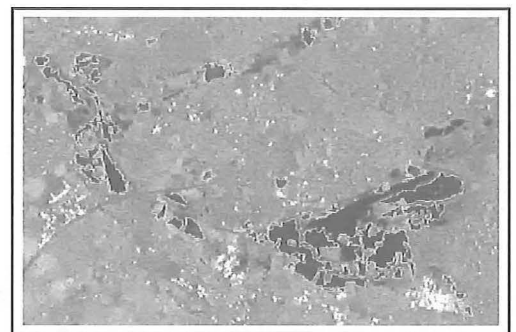
Bij de meeste beeldverwerkingprogramma's gebeurt de classificatie van beelden op basis van pixel gebaseerde algoritmes. De vraag naar object georiënteerde beeldverwerkingstechnieken neemt echter toe. De commerciële eCognition software promoot deze laatste aanpak en maakt gebruik van object georiënteerde algoritmes. In contrast met de traditionele pixel gebaseerde beeldverwerkingmethodes zijn de verwerkings-eenheden bij de objectgeoriënteerde methodes geen pixels maar segmenten of beeldobjecten. Ook de classificatie van het beeld gebeurt dan op basis van de objecten. De methodologische principes van object georiënteerde beeldverwerking is tweeledig: de segmentatie en de classificatie.

Eerst wordt er in eCognition een segmentatie uitgevoerd. De segmentatie is een "bottom-up" regio groeperingstechniek die start vanuit één pixel object. In meerdere opeenvolgende stappen worden smallere beeldobjecten tot grotere gegroepeerd. Het segmentatie-algoritme is niet enkel gebaseerd op de pixelwaarden maar ook op de ruimtelijke continuïteit van de resulterende objecten. De segmentatieparameters werden voor deze studie zorgvuldig gekozen.

Het tweede aspect van eCognition is zijn kennis gebaseerde classificatiesysteem. Dit maakt het mogelijk om naast de pixelwaarde ook andere attribuutwaarden mee te nemen in de classificatie. Voorbeelden hiervan kunnen zijn: vorm-informatie, textuurinformatie, relaties t.o.v. naburige objecten en meer. De hoeksteen van eCognition's kennisgebaseerde classificatiesysteem van beeldobjecten is de klassehiërarchie. De klassehiërarchie bevat de classificatieregels voor de classificatie van het beeld.

In deze studie werden de homogene beeldobjecten resulterend uit het segmentatieproces geclassificeerd in overstromd en niet overstromd gebied. Dit gebeurde aan de hand van twee opeenvolgende classificaties. In de eerste classificatie werden de donkere objecten uit het overstromingsbeeld geselecteerd. Binnen deze klasse werden de overstromde gebieden maar ook alle andere donkere objecten gegroepeerd. In een tweede classificatie werd een subklasse overstromd gebied gecreëerd door de overstromde gebieden te scheiden van de andere donkere objecten. Voor een overstromd gebied wordt een daling van de pixelwaarde verondersteld tov het referentiebeeld terwijl de andere donkere objecten zowel op het referentiebeeld als op het overstromingsbeeld min of meer dezelfde waarde zullen hebben.

Figuur 3: Netto overstromingsresultaat bekomen uit de verwerking in eCognition

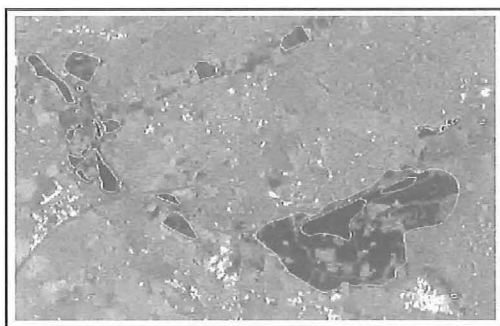


Actieve contour algoritme

Het actieve contour algoritme, een gebieds-gebaseerd algoritme dat recent werd ontwikkeld door Chesnaud et al. (1999), wordt hier voorgesteld om overstromingen af te lijnen. In dit oorspronkelijke algoritme moest een operator de initiële polygoon ruw schetsen op het geïsoleerde object. Bij deze toepassing werd een methodologie opgezet om deze initiële polygoon op een automatische manier te genereren. Dit gebeurde door het beeld om te zetten in een binair beeld

en enkele supplementaire bewerkingen. Eens de initiële polygoon gekend worden een reeks bewerkingen gestart waardoor de gezochte objectgrenzen automatisch worden bepaald. Deze bewerkingen worden ook hier zowel op het referentiebeeld als op het overstromingsbeeld toegepast waardoor een netto overstromingsresultaat bekomen wordt (figuur 4).

Figuur 4: Netto overstromingsresultaat bekomen uit de actieve contour methodologie



Beide methoden zijn complementair. Via eCognition worden de donkere objecten nauwkeuriger afgelijnd terwijl bij de actieve contourmethodologie het grootst mogelijke gebied wordt gevonden. De technieken zijn complementair omdat met eCognition enkel de wateroppervlaktes gekarteerd worden en bij de actieve contourmethodologie ook water met structuur, zoals bomen en struikgewas, wordt gedetecteerd.

Beide technieken zijn geschikt om overstromingen op middenschallig niveau semi-automatisch in kaart te brengen. Het is essentieel om te beschikken over radar-satellietbeelden van de getroffen regio.

Grootschalige overstromingskartering

Het Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen (AGIV) en het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) hebben een contract opgesteld met een helikoptermaatschappij om, in geval van overstromingen in Vlaanderen, binnen de 12 uren de lucht in te gaan voor het maken van digitale luchtopnames van de overstromingen vanuit waterlopen. Dit gebeurt na overleg met de verschillende waterbeheerders.

Na een haalbaarheidsanalyse van de verschillende beeldwinningstechnieken, blijkt dit momenteel de meest haalbare techniek te zijn.

Vanuit een helikopter worden met een WESCAM camera digitale oblieke beelden gemaakt van de overstroming met name de waterlijn. Simultaan worden er door een luchtfotograaf handmatig digitale foto's gemaakt van de overstroming. Kort na uitvoering van de vlucht worden deze beelden voorbereid en overgemaakt aan het Waterbouwkundig Laboratorium en het AGIV. De foto's en ook de filmbeelden worden voorzien van coördinaten zodat de opnames eenvoudig kunnen gelokaliseerd worden.

Het AGIV karteert de waterlijn op de beschikbare middenschallige orthofoto's binnen een GIS omgeving op basis van operationele interpretatie. Het resultaat is een gedetailleerde digitale thematische kaartlaag van de overstroming.

Deze kaartlaag zal kort na de overstroming zelf beschikbaar worden gesteld via het internet. De manier waarop dit zal gebeuren wordt momenteel onderzocht en uitgewerkt.

Figuur 5: Digitale oblieke luchtfoto genomen vanuit een helikopter en een voorbeeld uit de afgeleide overstromingskaart



Een nog te ontwikkelen schetstool, te gebruiken in de helikopter, zal weldra eveneens een snelle kartering mogelijk maken, waardoor enkele uren na de vlucht reeds aan de hand van de schetskaart een overzicht zal kunnen gegeven worden van de uitgestrektheid van de overstroming.

Het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen

Naar aanleiding van de grote overstromingen die Vlaanderen de laatste vijf jaar teisterden had het waterbeleid in Vlaanderen nood aan een accuraat en gebiedsdekkend digitaal hoogtemodel (DHM) dat kan dienen als input voor de hydrologische en hydraulische computermodellen. Het waterbeleid in Vlaanderen wordt vanuit het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap op het terrein in hoofdzaak gerealiseerd door twee administraties, met name de Vlaamse Milieu-maatschappij - Afdeling water en het Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken - Waterbouwkundig Laboratorium.

Eind 2000 sloegen deze administraties en AGIV de handen in elkaar om samen op een relatief korte termijn een nauwkeurig, multifunctioneel en gebiedsdekkend DHM voor Vlaanderen aan te maken. Het AGIV stond in het bijzonder in voor de technische projectcoördinatie, het uitvoeren van een kwaliteitscontrole en de aanmaak en distributie van DHM producten en artikels. De brondata worden door private aannemers aan-geleverd.

Voor het vervaardigen van een digitaal hoogtemodel werd de hoogte-informatie voornamelijk (95%) ingewonnen met laseraltimetrie. Laseraltimetrie is een techniek waarbij het aardoppervlak wordt gescand d.m.v. een lasersysteem aan boord van een vliegtuig of helikopter. De laserscanner werkt in het InfraRood-spectrum. Gesynchroniseerd met de laserwaarnemingen worden stand- en plaatsbepalingen van het vliegtuig uitgevoerd. Met de standbepaling wordt verwezen naar de schommelingen van het vliegtuig die door het gebruik van een Inertieel Navigatie Systeem (INS) berekend kunnen worden. Onder plaatsbepaling verstaan we de coördinaten die berekend worden met behulp van een Global Positioning System (GPS). Daarna worden deze gegevens (lasermetingen, GPS-metingen en INS-metingen) bij elkaar gebracht. Rekening houdend met de afstand tussen de aarde en het vliegtuig en de stand en de plaats van het vliegtuig wordt de hoogte van het terrein gemeten. Laserscanning is geen selectieve techniek, dit betekent dat zowel de maaiveldhoogte als de hoogte van alle voorkomende topografische objecten wordt geregistreerd tijdens de data-inwinning. In het dataverwerkingsproces worden, door middel van filtering, de grondpunten gescheiden van de punten gelegen op objecten (zoals gebouwen en vegetatie). Laserscanning of laseraltimetrie is in Vlaanderen zeker geschikt voor hoogtekartering in landelijk gebied en levert dus twee type hoogtepunten op, een verzameling grondpunten en een verzameling punten op vegetatie en gebouwen.

De data werden in stedelijke gebieden ingewonnen met behulp van fotogrammetrie. Het eindbestand is een verzameling onregelmatig verspreide punten op maaiveldhoogte met een gemiddelde dichtheid van 1 punt per 20m².

De nauwkeurigheid van de verzameling grondpunten uit laserscanning wordt bepaald door het type terrein. De beoogde nauwkeurigheid bedraagt 7 cm op kort gras en verharde oppervlakken tot 20 cm voor terreinen gekenmerkt door meer complexe vegetatie.

In de eerste plaats werden standaardproducten en standaardartikels geproduceerd die beantwoorden aan de eisen van de opdrachtgevers. Dit betekent dat momenteel enkel de grondpunten en meer specifiek de door de producenten aangeleverde en goedgekeurde eindbestanden met een puntendichtheid van 1 punt per 20m² worden verwerkt tot producten die onder de vorm van artikels verdeeld zullen worden. Het basisbestand bevat de origineel opgemeten punten gelegen op maaiveldhoogte. Naast dit basisbestand zullen ook rasterbestanden (5X5 meter, 25X25 meter en 100X100 meter) aangemaakt worden. Deze rasterbestanden werden geïnterpoleerd volgens het Inverse Distance Weight-algoritme en werden naargelang het schaalniveau versneden volgens de 1/10.000ste of 1/50.000ste topografische kaartbladindeling. De producten zijn beschikbaar via het productenportaal GIRAF van het AGIV (www.agiv.be).

Referenties

C. Chesnaud, P. Réfrégier and V. Boulet (1999), "Statistical Region Snake-Based Segmentation Adapted to Different Physical Noise Models", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, No. 11, pp. 1145-1157.

J. De Man, M. Brondeel, (2004). "Het digitaal Hoogtemodel Vlaanderen" *Geo-info*, 2004 vol. 2, pp. 47-56.

R. Heremans, A. Willekens, D. Borghys, B. Verbeeck, J. Van Valckenborgh, M. Acheroy, C. Perneel, (2003), "Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR images using an object-oriented classification technique and an active contour algorithm" In *Proc. IEEE Conf. on Recent Advances in Space Technologies (RAST2003)*, pages 289-294.

J. De Man, J. Van Valckenborgh
AGIV - Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen
Gebroeders Van Eyckstraat 16
9000 Gent

H. Vereecken
Vlaamse Overheid, Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium
Berchemlei 115
2140 Borgerhout

Real-time sturing van wachtbekkens

¹ Katholieke Universiteit Leuven

² Vlaamse Milieumaatschappij,
Afdeling Water

In een lopende studie van de K.U.Leuven voor de Afdeling Water van de Vlaamse Milieumaatschappij wordt de bruikbaarheid van regeltechniek onderzocht voor de specifieke toepassing van de real-time sturing van hydraulische regelstructuren. Meer specifiek wordt de techniek van Model Predictive Control (MPC) getoetst met het oog op het bekomen van een meest efficiënte regeling ter beheersing van overstromingen bij het ledigen en vullen van wachtbekkens. De regeling van de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom in het Demerbekken zijn als gevalstudie beschouwd. Het onderzoek maakt gebruik van het Operationeel BekkenModel (OBM) voor de Demer, dat door de Afdeling Water werd ontwikkeld voor real-time overstromingsvoorspelling in het Vlaamse Demerbekken.

Inleiding

In een lopend onderzoek voor de Afdeling Water van de Vlaamse Milieumaatschappij is een aanzet gegeven tot het uitwerken van een intelligente techniek voor het real-time sturen van wachtbekkens. Bedoeling is om een techniek uit te werken die op termijn moet toelaten om stuwen of hydraulische structuren aan te sturen op een automatische en meest efficiënte wijze. Die stuwen en structuren bepalen de vulling en de lediging van wachtbekkens. De huidige regeling gebeurt via waak- en alarmpeilen, vulvolgorden en -vulpeilen die vast zijn. Via een regeling die gebeurtenis-specifiek is en rekening houdt met toekomstig voorspelde afvoeren moet het mogelijk zijn om een meer efficiënte sturing te bekomen, en dus overstromingen op een meer efficiënte wijze te beheersen. Op dit ogenblik gebeurt de regeling ook reeds gebeurtenis-specifiek en wordt reeds rekening gehouden met real-time voorspelde afvoeren, maar op een subjectieve wijze die meer of minder efficiënt is in functie van de ervaring van de betrokken waterbeheerder. De huidige studie tracht een automatische regelprocedure en bijhorend algoritme uit te werken, gebruik makend van kennis die beschikbaar is in de regeltechniek (met toepassingen die zich momenteel vooral situeren in de elektronica en de scheikunde).

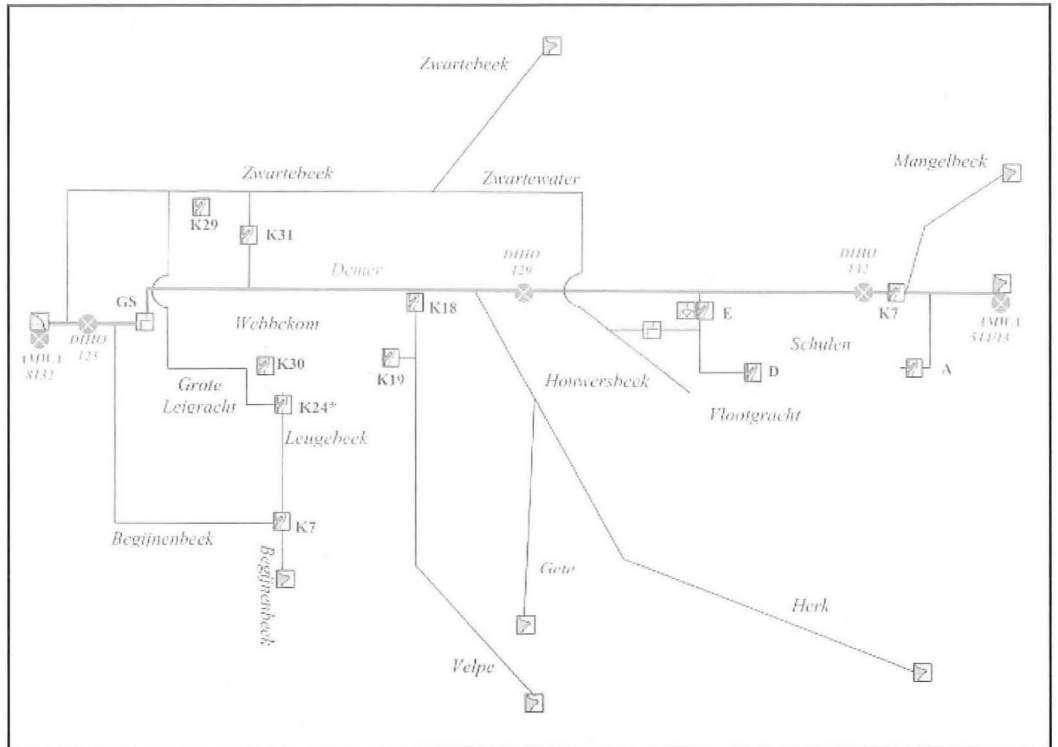
De studie wordt uitgevoerd door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven o.l.v. J. Berlamont en P. Willems, en de Afdeling SISTA van het Departement Elektrotechniek van de K.U.Leuven (ESAT-SISTA) o.l.v. B. De Moor. Ze is ingevuld door het doctoraatsonderzoek van T. Barjas-Blanco. Meer specifiek wordt de techniek van Model Predictive Control (MPC) vooropgesteld. Deze techniek wordt in de studie toegepast en geëvalueerd voor de wachtbekkens Schulensmeer en Webbekom langs de Demer. Er wordt gebruik gemaakt van de hydrologische en hydrodynamische modellering in het bestaande Operationeel BekkenModel (OBM) van de Demer, dat werd geïmplementeerd in de InfoWorks-RS en FloodWorks software van Wallingford Software Ltd.

De MPC-techniek wordt momenteel beloftevol aangewend in een breed domein aan toepassingen. Meest bekend zijn de toepassingen bij chemische reactoren. MPC is in vergelijking met andere gangbare technieken van regeltechniek een zeer geavanceerde methode die als voordelen heeft dat het kan rekening houden met beperkingen (vb. uiterste standen van de regelkleppen, maximaal toelaatbare beweging van de kleppen, grenzen waarbij overstroming optreedt, enz.), met toekomstig voorspelde waarden (vb. neerslagvoorspellingen), en met meervoudige regelobjectieven en prioriteiten. De auteurs hebben geen weet van een succesvolle toepassing van MPC voor overstromingsbeheersing langs rivieren. Een hydrologisch-hydraulisch waterlopen-netwerk heeft immers in vergelijking met andere toepassingen enkele specifieke moeilijkheden:

- het systeem (piekafvoeren, waterstanden, overstromingshoogten) reageert sterk niet-lineair op neerslag;
- de toestand van het systeem is sterk tijdsvariabel (sterk tijdsvariabele afvoer) waardoor het systeem werkpunten heeft die niet vast zijn; ook verschillen de regelpen in de tijd naargelang overstromingsdreiging zich aandient of niet, en naargelang overstromingen zich reeds hebben voorgedaan of niet; ook dit verschilt van wat gangbaar is in de klassieke regeltechniek;
- het systeem vertoont sprongsgewijze overgangen tussen toestanden (vb. in werking treden van een overlaat; al dan niet vullen van het wachtbekken);
- regelstrategieën zijn gecombineerd (regeling op meerdere plaatsen, met wisselwerkingen).

In de eerste fase van het onderzoek werden deze problemen onderzocht en oplossingen uitgewerkt. Dit werd om redenen van eenvoud gedaan voor een beperkt gedeelte van het model voor de omgeving van het Schulensmeer. Om de rekentijd te beperken, werd complementair aan het gedetailleerd hydrodynamische model, zoals geïmplementeerd in InfoWorks, een vereenvoudigd conceptueel model opgebouwd en gebruikt als basis van de MPC-regeling.

Figuur 1. Schematische structuur van het waterlopennetwerk, de wachtbekkens en de hydraulische regelstructuren in de omgeving van Schulensmeer en Webbekom (OBM-Demer, 2003).

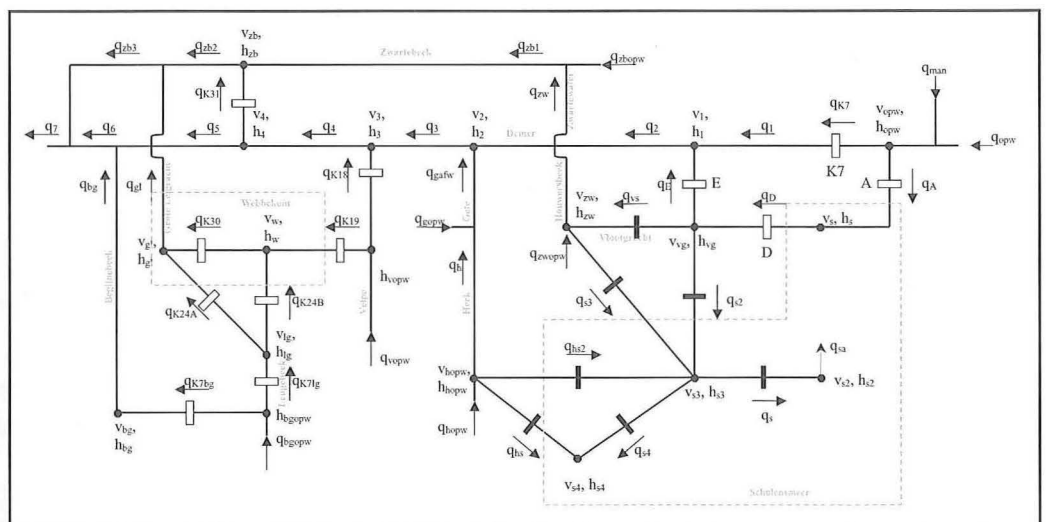


Studiegebied en hydrodynamische modelering

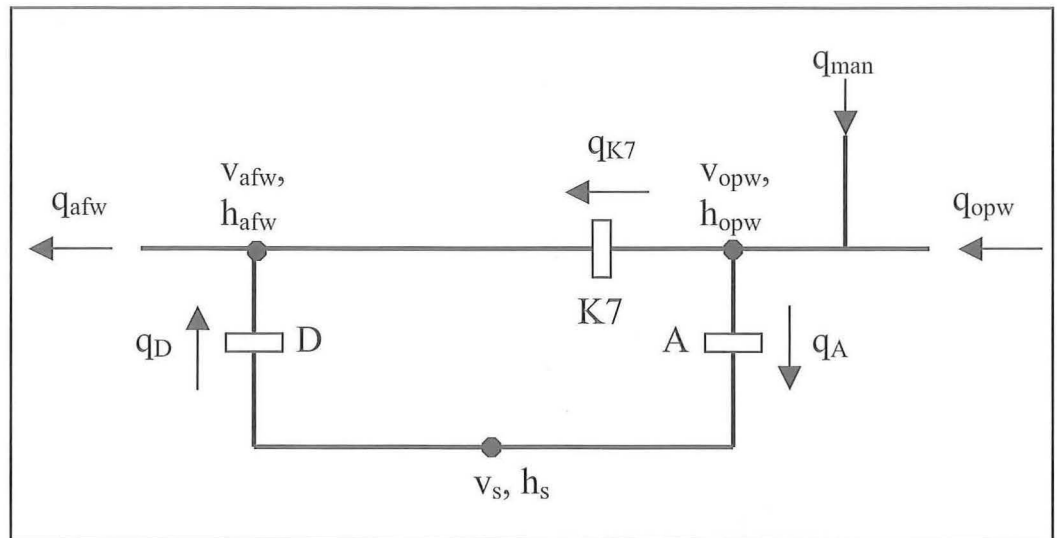
Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de InfoWorks-modelelementen van het OBM-Demer in het gebied van de gevalstudie rond de wachtbekkens van Schulensmeer en Webbekom opwaarts van Diest. Het gebied ontvangt opwaartse afvoer van de Demer, de Mangelbeek, de Herk, de Gete, de Velpe, de Zwarte Beek en de Begijnenbeek. Via de stuwen of regelstructuren A en K7 kan bij dreigende wateroverlast een deel van de opwaartse afvoer geborgen worden in het reservoir (dat uit zowel een binnenbekken als

meerdere gedeelten van een buitenbekken bestaat) geleidigd worden via de regelstructuren D en E. Het tweede wachtbekken rond Webbekom wordt gevuld en geleidigd via regelstructuren K18, K19, K7 aan de Leugebeek, K24* en K30. Figuur 2 geeft voor dit gebied de structuur weer van het conceptueel model. De riviertakken worden in dit schema weergegeven door lijnstukken met de positieve stromingsrichting aangeduid via de pijlen, de regelstuwen door holle rechthoeken, de vaste overlaten door volle rechthoeken, en de modeldelen waarin de berging en de gemiddelde waterhoogte worden berekend door volle knopen. Voor de debietvariabelen is het symbool "q" gebruikt, "h" voor waterhoogten, "v"

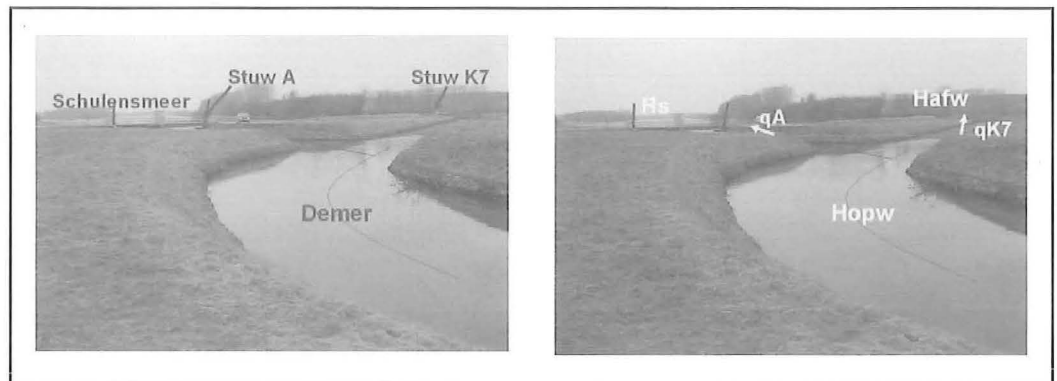
Figuur 2. Conceptuele modelstructuur van het gebied Schulensmeer en Webbekom.



Figuur 3. Conceptuele modelstructuur van het deelmodel rond het binnenbekken van het Schulensmeer.



Figuur 4. Foto van de Demer aan de inlaat van het Schulensmeer.



voor volumes, en "k" voor de klepstand van de regelstuw. De waterhoogten en de volumes worden in de MPC-regelaar beschouwd als toestandsvariabelen, de klepstanden als ingangen en de opwaartse debieten als storingen van de regelaar.

In dit artikel worden de resultaten voorgesteld voor het deelgebied rond het binnenbekken van het Schulensmeer. Dit deelgebied werd uit het grotere model "geknipt" en vereenvoudigd zoals aangegeven in Figuur 3. Enkele van de model-elementen zijn aangeduid in de foto van Figuur 4.

De vereenvoudigde conceptuele modellen zijn van het reservoir-type. Hun modelvergelijkingen zijn geïdentificeerd en de parameters gecalibreerd op basis van simulatieresultaten met het gedetailleerd volledig hydrodynamisch OBM-InfoWorks model. Dit gebeurt onder meer via de calibratie van de volume-doorvoerrelaties volgens de methodologie beschreven in Vaes et al. (2002). Na opbouw van het vereenvoudigd model is een validatie doorgevoerd door vergelijking met zowel de resultaten van het OBM-InfoWorks model als met de werkelijke metingen voor een aantal historische wassen (Figuur 5).

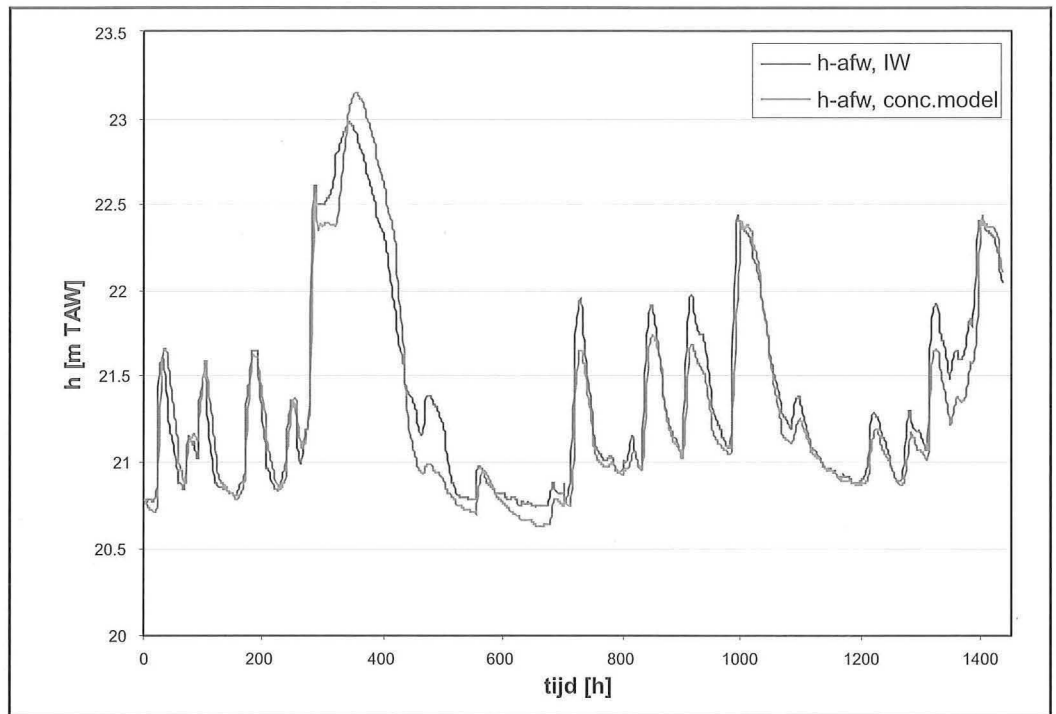
Zowel het OBM-InfoWorks model als het vereenvoudigd conceptueel model hebben een simulatiestap van 5 min. De uitvoerresultaten van het conceptueel model zijn geaggregeerd tot een tijdstap van 1h.

Implementatie MPC-techniek

De MPC-techniek laat toe om de klepstanden van de hydraulische regelstructuren (de ingangen van de regelaar) zodanig te bepalen dat de modelvoorspellingen zo dicht mogelijk liggen bij de gewenste referentiewaarden (de uitgangen van de regelaar). Hiervoor worden kost- en objectiefuncties gedefinieerd. Het algoritme zal de ingangen zodanig bepalen dat de uitgangen in de toekomst zo snel mogelijk naar de gewenste referentie gaan. Dit gebeurt op basis van kennis over de huidige toestand van het systeem en het gekende systeemmodel. Op iedere tijdstap wordt er een optimalisatieprobleem opgelost met de introductie van feedback in het systeem waardoor afwijkingen tengevolge van storingen en onzekerheden kunnen worden opgevangen.

Zoals in de inleiding gesteld werden op basis van de implementatie voor het beperkt model rond

Figuur 5. Vergelijking modelresultaten van het InfoWorks-model en het conceptueel model voor de waterhoogte in de Demer afwaarts van regelstuwen A en K7; simulatie historische wassen van september 1998 en januari 2002.



Schulensmeer oplossingen uitgewerkt voor een aantal technische problemen die zich blijken voor te doen bij toepassing van het klassieke MPC-algoritme op een hydrologisch-hydrodynamisch systeemmodel van een waterloppennetwerk. Het probleem van de niet-lineaire modelstructuur werd opgelost door de techniek van iteratieve meer-voudige linearisatie. Het probleem van de spronggewijze toestandsveranderingen (via de if-then-else-modelstructuur bij bijvoorbeeld de stuw) en een bijkomend probleem rond oncontroleerbare toestanden van het systeem werd opgelost door het gebruik van een 'fuzzy control' model. Gecombineerde regelstrategieën (verschillende variabelen en locaties, referentiepeilen versus minimale en waak/alarmpeilen, volgorde van prioriteiten, en eventuele andere wensen van de waterbeheerder) werden mogelijk gemaakt via de aangepaste keuze van de objectief- en kostfuncties. Ten slotte werd de MPC-regelaar in grote mate versneld door aanpassingen aan de optimalisatiealgoritmen.

Regelobjectieven en -prioriteiten: Met het oog op de MPC-regeling zijn na overleg met de Afdeling Water regelobjectieven vastgelegd. Onder normaal regime wordt het wachtbekken maximaal geleegd, en tracht men het opwaartse waterpeil langs de Demer op een constant peil te regelen (21.5 m TAW). Als harde beperkingen zijn er de minimale en maximale klepstanden van de regelstuwen. In de huidige regeling maakt men gebruik van de waak- en alarmpeilen op- en afwaarts langs de Demer. Bij overschrijding van de waakpeilen wordt het wachtbekken gevuld, stapsgewijs tot een bepaald peil. Na het bereiken van dit vulpeil laat men de waterpeilen langs de Demer verder toenemen, tot de alarmpeilen, waarna het

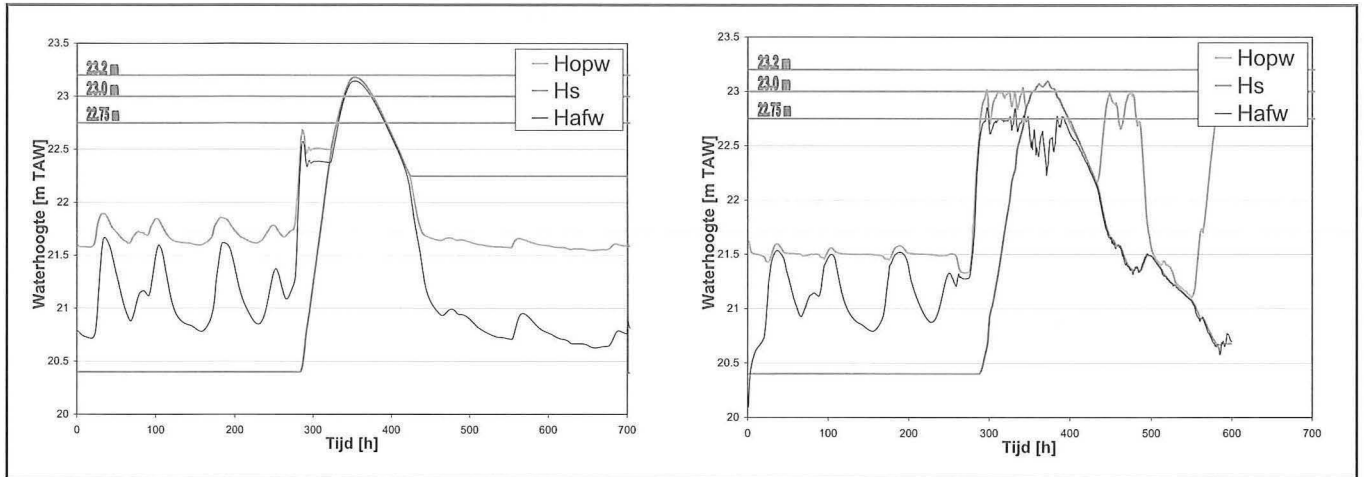
wachtbekken verder worden gevuld. In de MPC-regeling is voorlopig met dezelfde regelprioriteiten gewerkt.

Resultaten

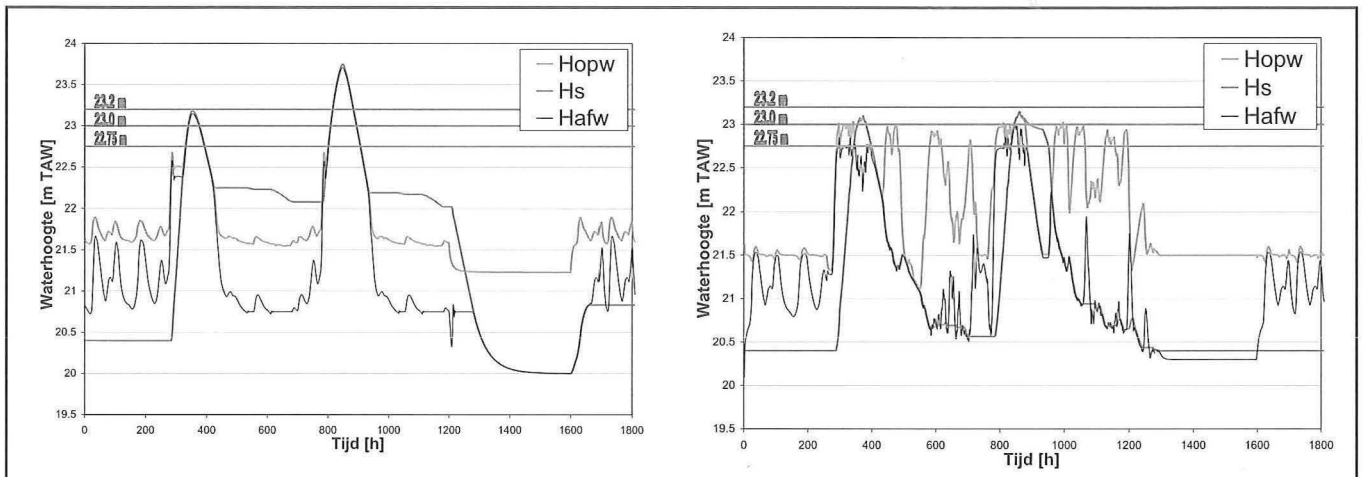
In de Figuren 6 en 7 worden de resultaten van de huidige regeling, zoals geïmplementeerd in het model, vergeleken met de MPC-regeling. Figuur 6 toont de resultaten voor de historische was van 1998. Uit de resultaten bij de eerste 250 uur blijkt dat de MPC-regeling de opwaartse peilen langs de Demer effectief naar 21.5 m regelt. Tijdens de was wordt het Demerpeil over de volledige periode beperkt tot 23 m opwaarts en 22.75 m afwaarts. De vulling van het Schulensmeer neemt hiervoor niet toe en wordt beperkt tot 23.10 m. Na de was wordt het Schulensmeer sneller geleegd. De efficiëntieverhoging blijkt in dit geval gerealiseerd door bijkomende afvoer naar afwaarts en bijkomende berging opwaarts tijdens bepaalde deelperioden voor en na de wasperiode.

Om de invloed na te gaan van het in rekening brengen van toekomstige afvoeren, is bij Figuur 7 de historische was van 1998 tweemaal kort achter elkaar gesimuleerd. Ook voor de tweede was blijken de peilen beperkt tot 23 m. Dit wordt gerealiseerd door bijkomende afvoer en lediging van het Schulensmeer tussen de twee wassen, anticiperend op de hoge afvoer voorspeld voor de beschouwde zichttijd.

Figuur 6. Simulatie van de historische was van september 1998; (links) voor de huidige regeling zoals geïmplementeerd in het model, (rechts) de MPC-regeling.



Figuur 7. Simulatie van twee fictief en kort na elkaar voorkomende sept. 1998 wassen; (links) voor de huidige regeling zoals geïmplementeerd in het model, (rechts) de MPC-regeling.



Conclusies

Op basis van de resultaten van de simulaties voor de historische wassen van 1998 en 2002 is aangetoond dat de regelaar in staat blijkt om de gewenste objectieven te bekomen, en dat via MPC-regeling de efficiëntie van de regeling in belangrijke mate kan worden verhoogd. Dezelfde conclusies zijn bekomen bij het kort na elkaar simuleren van twee grote wassen. De MPC-regelaar blijkt verder voldoende flexibiliteit te bieden om gecombineerde regelstrategieën (verschillende variabelen en locaties, referentiepeilen versus minimale en waak/alarmpeilen, volgorde van prioriteiten, vulvolgorden, enz.) met succes te implementeren.

Tijdens de vervolgstudie zal de MPC-regeling verder uitgewerkt en getest worden voor het meer uitgebreide gebied, inclusief het buitenbekken van Schulensmeer, Webbekom en de interacties met de Herk, Gete, Houwersbeek, Zwart Water, Zwarte Beek, Velpe, Begijnenbeek, Leugebeek en Grote Leigrecht. De MPC-regeling zal voor dit meer complexe systeem verder geanalyseerd worden;

voor de regelstrategieën, die door de Afdeling Water zijn vooropgesteld voor het volledige gebied Schulensmeer – Webbekom. Belangrijke aandacht zal uitgaan naar het halen van de regelobjectieven, het minimaliseren van de overstromingen en de rekentijd voor het berekenen van de optimale klepstanden.

Ook zal gewerkt worden aan het versnellen van de regelaar en het uittesten van een vrije regeling. Het versnellen van de regelaar is nodig om voor het uitgebreide model (met een zeer groot aantal toestandsvariabelen en te regelen stuwen) de rekentijden voldoende beperkt te houden (vb. kleiner dan 15min per regelstap), zodat operationele implementatie haalbaar wordt. Verder zal een vrije regeling worden uitgetest, in tegenstelling met de huidige MPC-regeling die gebruik maakt van een aantal vooraf gedefinieerde prioriteiten. Deze zijn voorlopig identiek genomen aan deze van de huidige regeling. Een volledig vrije regeling, zonder vooraf gedefinieerde prioriteiten, maar met optimalisatie van een globale objectief-functie (vb. op basis van het totale overstromings-volume of -schade, gecombineerd op verschillende locaties) moet haalbaar zijn.

Referenties

Barjas-Blanco, T., Willems, P., (2006). "Onderzoek naar intelligente sturingstechnieken voor operationeel oppervlaktewaterbeheer", Tussentijds rapport door K.U.Leuven voor VMM – Afdeling Water, september 2006, 47 p.

OBM-Demer (2003). "Operationeel Bekken Model Demer", Technische Beschrijving v2.0, Wallingford Software – Soresma – IMDC, november 2003.

Vaes, G., Willems, P., Berlamont, J. (2002). "Het gebruik van bakmodellen voor de voorspelling van de invoer in riviermodellen ter plaatse van riooloverstorten met het oog op een geïntegreerde modellering", Studie in opdracht van AMINAL - Afdeling Water, in samenwerking met IMDC, Eindrapport februari 2002.

T. Barjas-Blanco^{1,2}
Doctorandus K.U.Leuven

P. Willems¹,
Postdoctoraal onderzoeker FWO-Vlaanderen en
gastdocent K.U.Leuven

J. Berlamont¹
Gewoon hoogleraar K.U.Leuven

B. De Moor²
Gewoon hoogleraar K.U.Leuven

K. Cauwenberghs³, S. Rombauts³,
F. Raymaekers³
Ingenieurs Afdeling Water - Vlaamse Milieu-
maatschappij

¹Katholieke Universiteit Leuven, Afdeling
Hydraulica
Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee
(Leuven), tel. 016 32 16 58, fax 016 32 19 89,
E-mail: Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

²Katholieke Universiteit Leuven,
Afdeling ESAT-SISTA
Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Heverlee
(Leuven), tel. 016 32 17 09, fax 016 32 19 70,
E-mail: Toni.Barjas-Blanco@esat.kuleuven.be

³Vlaamse Milieu-maatschappij, Afdeling Water
Graaf de Ferraris-gebouw, Koning Albert-II laan
20, 1000 Brussel, tel. 02 553 21 29, fax 02 553
21 05,
E-mail: kris.cauwenberghs@lin.vlaanderen.be

Omgaan met watertekorten in het Albertkanaal en de Kempense kanalen

¹ Universiteit Antwerpen,
Ecosystem Management
Research Group

² Waterbouwkundig Laboratorium

³ Resource Analysis NV

⁴ De Scheepvaart NV

Het water dat door het kanalenstelsel van het Albertkanaal en de Kempense kanalen stroomt, is afkomstig van de Maas. Het Maaswater wordt aangewend voor het verschutten van schepen, de koeling van elektriciteitscentrales en industriële productieprocessen, drinkwaterproductie, als proceswater voor industrie, bevoeiing van landbouw- en natuurgebieden e.a. en dit zowel in Vlaanderen als in Nederland. De beschikbaarheid van dit water wordt daarbij vaak als vanzelfsprekendheid beschouwd aangezien er zich tot op heden geen noemenswaardige problemen hebben voorgedaan. Een extreme droogteperiode zoals deze van 1976 zorgt nochtans voor een aanzienlijke vermindering van de Maasafvoer. Sinds 1976 is het gebruik van het Maaswater aanzienlijk toegenomen. Om de gevolgen van een droge periode door deze toename in te schatten, werd een computermodel opgemaakt van het kanalenstelsel waarmee het watergebruik van 2002 werd gesimuleerd bij een wateraanvoer van de Maas anno 1976 en 2003. Om na te gaan hoe er best met dergelijke periodes van watertekorten kan worden omgegaan werden verscheidene besparingsstrategieën getest.

LAGE RIVIERAFVOEREN EN WATERTEKORTEN

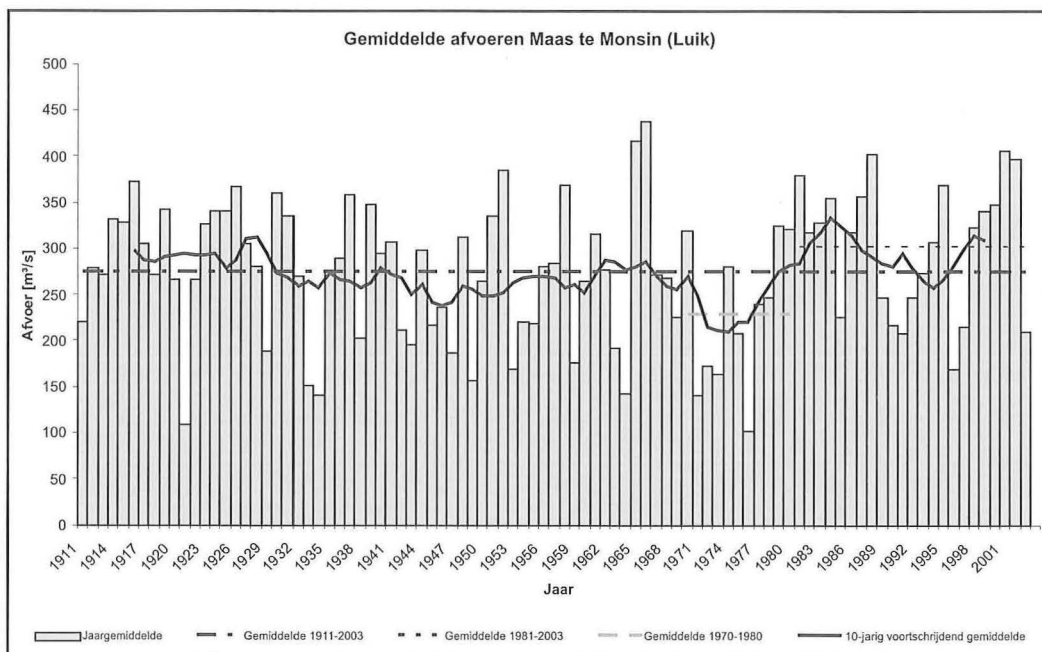
Lage rivierafvoeren behoren tot de natuurlijke variatie van riviersystemen en worden veroorzaakt door de seizoenale verandering in de neerslag-, oppervlakkige afvoer-, infiltratie- en verdampingsprocessen van de hydrologische cyclus. Watertekorten daarentegen zijn door de mens geïnduceerde fenomenen die zich voordoen op het ogenblik dat het (natuurlijke) watersysteem niet meer in staat is voldoende water te leveren om aan alle watervragen van de socio-economische waterketen te voldoen.

Doordat de watervraag van de waterketen gedurende de laatste decennia is toegenomen (en nog altijd toeneemt), hebben lage rivierafvoeren een

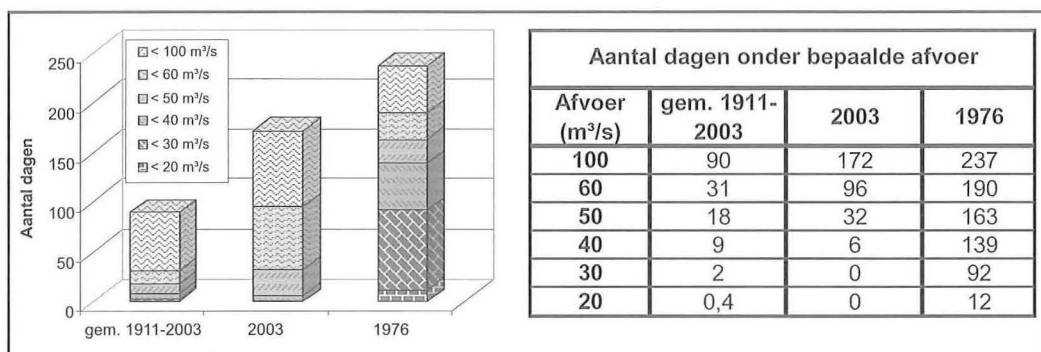
steeds grotere impact op onze waterafhankelijke maatschappij.

Periodes van lage afvoer in de Maas kunnen ernstige problemen veroorzaken voor de waterhuishouding in een deel van Vlaanderen en Nederland. Zoals afgebeeld in figuur 1 kan de jaarlijks gemiddelde afvoer van de Maas sterk variëren. Wanneer we kijken naar het voortschrijdende 10-jarlijks gemiddelde, komen we tot de vaststelling dat de gemiddelde afvoer gedurende de periode 1970-1980 relatief laag was in vergelijking met de laatste 20 jaren, waarbij het jaar 1976 de langste periode van lage afvoeren bevat die tot nog toe werd waargenomen op de Maas. In vergelijking met de zomer van 1976, was de zomer van 2003 slechts een klein broertje.

Figuur 1. Jaarlijks gemiddelde, gemiddelde over de periode 1911-2003 en 10-jaarlijks voortschrijdend gemiddelde afvoer van de Maas te Monsin (Luik) voor de periode 1911-2003.



Figuur 2. Aantal dagen per jaar waarop de Maasafvoer onder een bepaalde (kritieke) afvoer ligt; gemiddeld over de periode 1911-2003 en in het bijzonder voor de specifieke jaren 1976 en 2003.



In 1995 werd het Verdrag tussen het Vlaamse Gewest en het Koninkrijk Der Nederlanden inzake de afvoer van het water van de Maas (hierna het Maasafvoerverdrag genoemd) ondertekend waarmee de verdeling van het beschikbare water tussen de 2 regio's en de Gemeenschappelijke Maas tijdens periodes van lage afvoer werd vastgelegd. In het verdrag worden 3 niveaus voor de ongedeelde afvoer te Monsin (Luik) gedefinieerd (100, 60 en 30 m³/s) waaronder beide regio's hun watervragen moeten verminderen door besparingen in te voeren. Deze afvoeren kunnen beschouwd worden als grenzen waaronder watertekorten optreden in het Vlaamse systeem van het Albertkanaal en de Kempische kanalen. In figuur 2 wordt weergegeven hoe frequent deze grenzen onderschreden worden.

LAAGWATERSTRATEGIEËN

Tot voor kort waren in Vlaanderen de kennis, het begrip en het bewustzijn van laagwatersituaties en hun gevolgen eerder beperkt. De nadruk lag bij watergerelateerde problemen vooral op bescherming tegen overstromingen. Het (beperkte) watertekort tijdens de zomer van 2003 bracht hier in enige mate verandering in. Er was duidelijk nood aan meer inzicht in de effecten van periodes van lage Maasafvoer. Met het project "Zoetwaterbeheer" tracht de Vlaamse Overheid dan ook te streven naar een meer duurzaam gebruik van de beschikbare hoeveelheid zoetwater tijdens periodes van watertekorten.

Om gedurende dergelijke periodes op een zo efficiënt mogelijke wijze met het beschikbare water om te gaan is een draaiboek van besparingsmaatregelen, ook wel laagwaterstrategie genoemd, nodig. Daarbij zijn bv. de reductie van wateronttrekkingen of het aanspreken van de beschikbare drinkwaterreserves verschillende mogelijke maatregelen. De volgorde en intensiteit van de verschillende maatregelen bepaalt daarbij hoe groot de impact is op het systeem en de maatschappij. Het is dus wenselijk om de impact van verschillende alternatieve laagwaterstrategieën te onderzoeken om het beste alternatief te weerhouden.

In 2003 werd daartoe een onderzoeksoopdracht op het Waterbouwkundig Laboratorium opgesteld waarmee op onderstaande onderzoeksvragen een antwoord kon worden geformuleerd:

1. Wat zijn de gevolgen van een watertekortperiode (1976, 2003) rekening houdend met de bepalingen van het Maasafvoerverdrag en de toegenomen watervraag (anno 2002)?
2. Welke volgorde van besparingsmaatregelen is optimaal om de schade zo veel mogelijk te beperken?
3. Hoe zwaar kan de schade beperkt worden door pompinstallaties te installeren op de sluizencomplexen van het Albertkanaal waarmee een groot deel van het schutwater kan worden teruggepompt?

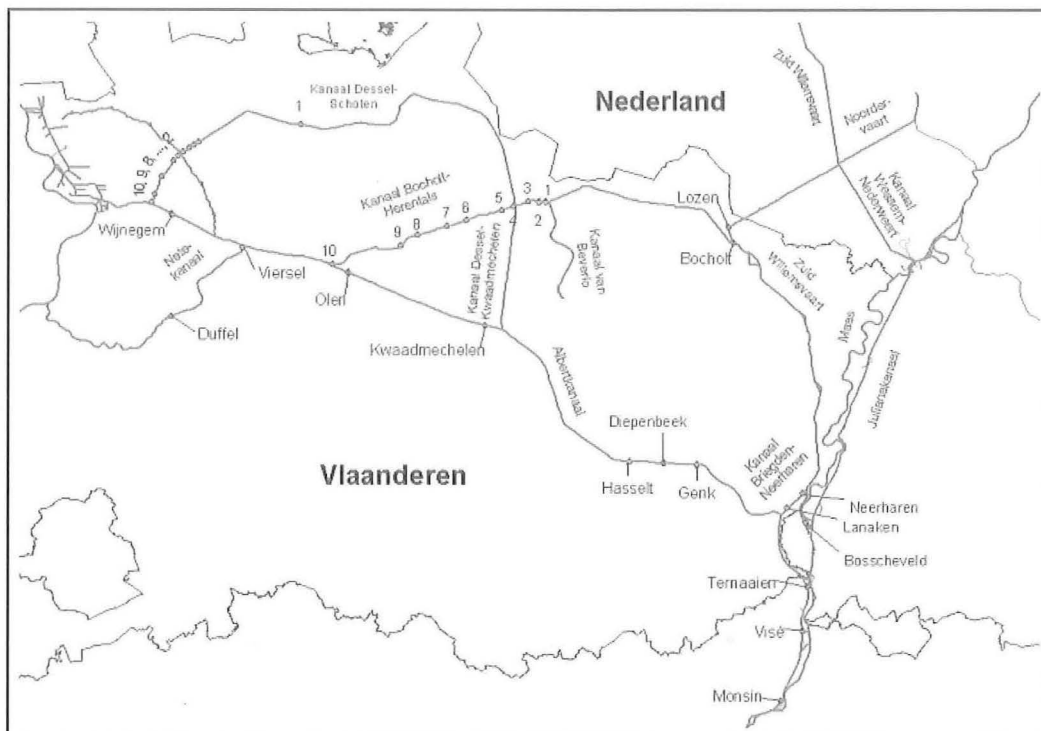
BEÏNVLOEDINGSGBIED

Het gebied dat in Vlaanderen afhankelijk is van Maaswater, volgt in grote lijnen het kanalenstelsel, wat zich uitstrekt over de provincies Limburg en Antwerpen. De grootte van het gebied is echter sterk sectorafhankelijk. Voor de drinkwatersector strekt het gebied onder invloed van de Maas zich uit over het ganse verzorgingsgebied van de Antwerpse Water Werken (AWW). Dit komt in grote lijnen overeen met Groot Antwerpen. Voor de sector industrie is het beïnvloede gebied eerder beperkt in oppervlakte, geconcentreerd langs het kanalenstelsel, maar verspreid over het ganse gebied. Het is dus onmogelijk eenduidig een gebied aan te duiden dat beïnvloed wordt door Maaswater. In figuur 3 wordt een overzicht gegeven van het watersysteem.

INVENTARISATIE

In eerste instantie werd een inventaris (Baetens & Van Eerdenbrugh, 2005) opgesteld van alle relevante watervragen en watergebruikers aan het Albertkanaal en de Kempische kanalen. Aan de basis voor deze inventarisatie lagen vergunningen voor watercaptaties, literatuurstudie, terreinbezoeken, metingen (Baetens & Meulenijzer, 2006) en analyse van topografische kaarten. Na selectie van de relevante waterstromen werden de watergebruikers bevestigd met enquêtes en interviews.

Figuur 3. Situering van het watersysteem met aanduiding van de verschillende sluisen.



De bevraging was gericht op hun afhankelijkheid van Maaswater, de variatie in hun watergebruik, de economische (en andere) gevolgen van watertekorten en hun houding tegenover verschillende maatregelen om het waterverbruik in te perken tijdens periodes van lage afvoer. Tijdens een workshop werd vervolgens feedback gegeven op de verwerking van de ontvangen informatie en werden de watergebruikers geïnformeerd over het vervolg van het onderzoek.

GROOTTE EN VARIABILITEIT VAN DE WATERVRAGEN

In Tabel 1 worden de jaargemiddelde watervragen van de verschillende "sectoren" weergegeven voor 2002.

De "sector" irrigatiewatervragen is in feite een samenvoeging van verschillende sectoren (landbouw, natuur, recreatie, visteelt, ...) die afhankelijk is van het water dat via de watervragen aan het kanalenstelsel wordt onttrokken.

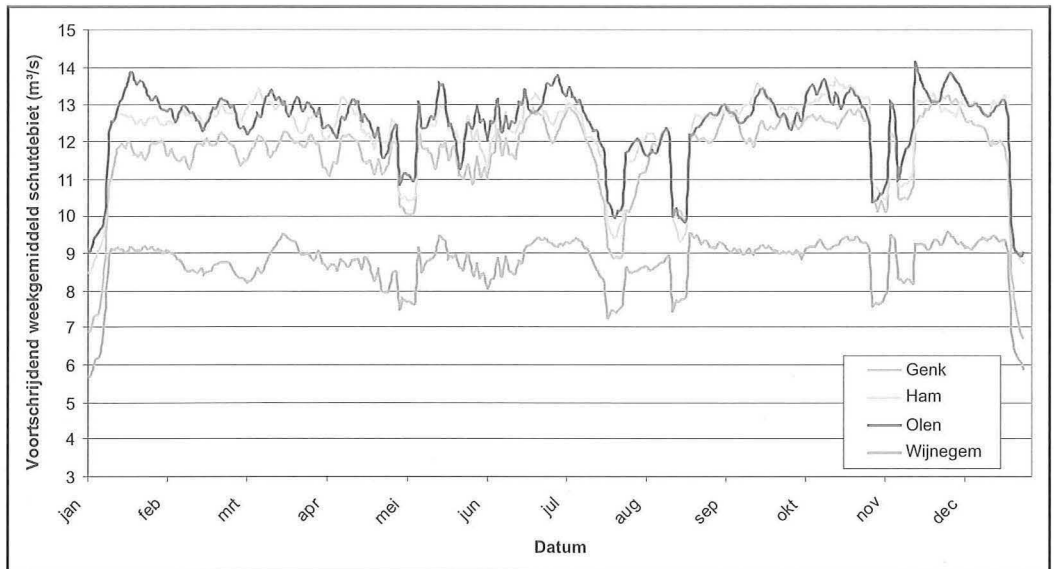
De bruto watervraag komt in principe overeen met het watergebruik, terwijl de netto watervraag het werkelijke verbruik aangeeft. Interpretatie van deze gegevens is riskant omdat het in feite een schematisering is van de werkelijkheid. Uit de gegevens zou bv. kunnen geconcludeerd worden dat de totale bruto watervraag 31,3 m³/s (=som van bruto watervragen) bedraagt met een netto watervraag van 10,5 m³/s (=som van netto watervragen). Daarbij wordt dan geen rekening gehouden met de plaats in het kanalenstelsel waar de watervragen gesitueerd zijn. Hieronder wordt dit toegelicht voor de scheepvaart- en drinkwatersector.

Door het grote verval tussen Luik en Antwerpen (ca. 56 m) is de bruto watervraag voor de scheepvaart het grootst. Voor het verschutten van schepen is er immers een bepaalde hoeveelheid water nodig. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de dimensies van de sluis, het te overbruggen verval tussen beide kanaalpanden en de scheepvaartintensiteit. De grootste watervraag situeert zich op het Albertkanaal door de grote sluisdimensies

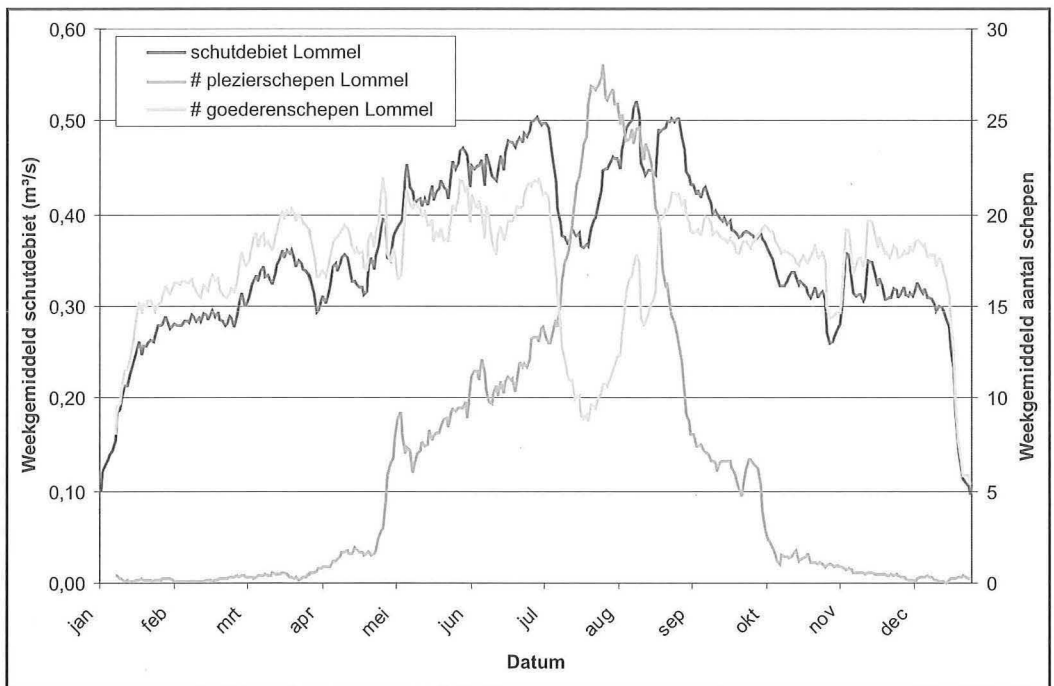
Tabel 1. Bruto, netto gemiddelde en maximale watervraag van de verschillende "sectoren" voor 2002.

Sector	Bruto gemiddelde watervraag 2002 (m ³ /s)	Netto gemiddelde watervraag 2002 (m ³ /s)	Maximale watervraag (m ³ /s)
Scheepvaart	13,86	0,00	
Industrie	1,90	0,75	
Elektriciteit	7,73	1,99	
Drinkwater	4,55	4,55	
Irrigatiewatervragen	2,50	2,50	3,69
Natuur- en groengebieden	0,55	0,55	
Waterbeheer	0,20	0,20	

Figuur 4. Voortschrijdend weekgemiddeld schutdebiet voor de beroepsscheepvaart van enkele sluiscomplexen op het Albertkanaal, gemiddeld over de periode 2000-2003.



Figuur 5. Voortschrijdend weekgemiddeld aantal plezier- en goederenscheepen en schutdebiet voor de sluis te Lommel op het kanaal Bocholt-Herentals.



(200 m x 24 m en 136 m x 16 m) en het grote verval van de sluizen te Genk, Diepenbeek, Hasselt, Ham en Olen (ca. 10 m). Doordat het verval over de meer stroomafwaarts gelegen sluis van Wijnegem kleiner is (ca. 5,5 m) dan bij de overige sluizen op het Albertkanaal is er in het kanaalpand Olen-Wijnegem een overschot aan water beschikbaar. In principe is er geen netto watervraag van de scheepvaart omdat het water stroomafwaarts nog steeds beschikbaar is voor andere doeleinden. Wel is dit water slechts voor ander gebruik beschikbaar in de kanaalpanden stroomafwaarts Olen en dus niet elders in het kanalenstelsel. Het is dan ook om die reden dat de drinkwaterproductie van AWW zich in deze zone heeft gevestigd. De beschikbaarheid van water in een bepaald kanaalpand is dus afhankelijk van wat er in de rest van het kanalenstelsel (opwaarts en afwaarts) nodig is.

De cijfers in tabel 1 geven bovendien een beeld van de jaargemiddelde watervraag en houden dus geen rekening met de variatie van de verschillende watervragen in de loop van de tijd. In figuren 4 en 5 wordt deze variatie getoond voor de beroeps- en pleziervaart.

Uit figuur 4 blijkt dat de watervraag van de beroepsscheepvaart tijdelijk vermindert tijdens de verlofperiodes van mei, juli, augustus en november.

Uit figuur 5 blijkt de watervraag van de pleziervaart toe te nemen rond mei om in augustus zijn hoogtepunt te bereiken op het ogenblik dat de beroepsvaart net wat minder water nodig heeft.

Voor het kwantificeren van de waterbehoefte van (geïrrigeerde) landbouwgebieden gedurende het groeiseizoen werd met behulp van de modelsoftware IRSIS (KULeuven) een afzonderlijke studie uitgevoerd (Elsen et al., 2005). De watervraag van deze sector is immers in sterke mate afhankelijk van de heersende meteorologische omstandigheden, waterhuishouding van de bodem, specifieke teelten, etc.

De totale Vlaamse waterbehoefte vanuit de Maas kan dus enkel berekend worden door met al deze aspecten rekening te houden.

WATERBALANSMODEL

Om meer inzicht te krijgen in de grootte en variatie van de Vlaamse watervraag werd een gedetailleerd waterbalansmodel van het kanalenstelsel opgesteld waarin alle verzamelde data en informatie werd geïntegreerd. Het kanalenstelsel wordt daarbij schematisch weergegeven zodat alle watergebruikers worden voorgesteld aan de hand van hun tijdsafhankelijke en variabele watervragen. Als basis voor het model werd gebruik gemaakt van de software Mike Basin (DHI). Voor de watervragen van de individuele watergebruikers werden dagwaarden van 2002 gebruikt. Voor het aanbod van het watersysteem (Maasafvoer en lokale meteorologie) werden daggemiddelde gegevens van historische periodes met lage afvoer (1976 en 2003) gebruikt. Omdat Mike Basin geen kanaalpannen kan modelleren, werd de software uitgebreid met enkele Visual Basic modules om de waterbalansberekeningen uit te voeren. Om na te gaan in hoeverre het model de werkelijkheid benadert, werd de werkelijk opgetreden Vlaamse watervraag van 2002 berekend aan de hand van de meetposten op het Albertkanaal (Kanne) en de Zuid-Willemsvaart (Smeermaas – Lozen). In figuur 6 en tabel 2 wordt de overeenkomst tussen de gemeten en gesimuleerde Vlaamse watervraag weergegeven.

Tabel 2: Vergelijking van enkele statistieken voor de gemeten en gesimuleerde tijdreeks van de totale Vlaamse watervraag anno 2002.

	Metingen	Simulatie
MIN	0,55	4,41
MAX	38,17	29,46
GEM	24,88	22,50
STDEV	7,17	5,32
Correlatiecoëfficiënt		0,86

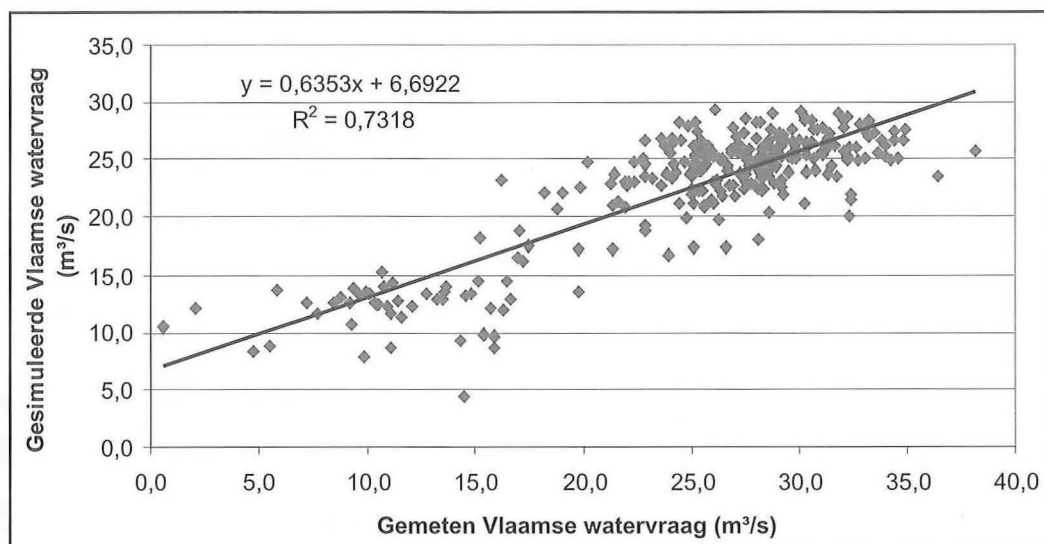
Uit deze gegevens blijkt dat de maximale en gemiddelde watervraag in werkelijkheid groter is dan wat er met het model gesimuleerd wordt. Dit houdt in dat de grootte van de effecten van een watertekortperiode in werkelijkheid groter zal zijn dan wat er gesimuleerd wordt, m.a.w. de modeluitkomsten geven een onderschatting van de werkelijkheid.

ECONOMISCHE SCHADE, NIET-KWANTIFICEERBARE GEVOLGEN EN LAAGWATER-STRATEGIEËN

Voor elke watergebruiker werd een schadefunctie opgesteld waarmee de (directe) economische schade van een beperking van de waterbevoorrading kan worden bepaald (IMDC & RA, 2006). Aangezien economische schade niet noodzakelijk het enige belangrijke gevolg is van een beperking in de waterbevoorrading, werden er tegelijkertijd ook voor een aantal specifieke watergebruiken de (economisch) niet-kwantificeerbare gevolgen bepaald. Voorbeelden van dergelijke niet-kwantificeerbare gevolgen zijn bv. het aantal dagen dat de drinkwaterreserves van AWW uitgeput geraken of het aantal dagen waarop bepaalde kwetsbare natuur door verdroging onomkeerbare schade zou oplopen (Baetens et al., 2006a). Zowel de schadefuncties als de niet-kwantificeerbare gevolgen werden met behulp van Visual Basic modules bijgeprogrammeerd.

Om een watertekortperiode het hoofd te bieden moeten er besparingsmaatregelen genomen worden. Daarbij zullen steeds verdergaande maatre-

Figuur 6: Vergelijking tussen de gemeten en gesimuleerde Vlaamse watervraag anno 2002.



gelen moeten genomen worden naarmate het watertekort toeneemt. In het onderzoek werden volgende mogelijke maatregelen in overweging genomen:

- beperking van de waterbevoorrading van de verschillende watergebruikers met 25, 50, 75 en 100 % of m.a.w. tot 75, 50, 25 en 0 % van de watervraag
- gegroepeerd schutten van schepen door het invoeren van een wachttijd aan de sluisen
- terugpompen van schutwater over de sluisen heen (door nog te installeren pompinstallaties)
- stopzetten van de scheepvaart
- aanspreken van de waterreserves (vnl. van de drinkwatersector)

Het waterverdelingsmodel werd uitgebreid met de gevolgen van de besparingsmaatregelen. Voor de maatregel "gegroepeerd schutten" werd de resulterende afname van de watervraag en de optredende economische schade met behulp van een afzonderlijke scheepvaartmodule berekend (Baetens et al., 2006a). De resultaten van deze berekeningen werden eveneens geïntegreerd in het model.

Het uiteindelijke model evalueert op dagbasis of Vlaanderen nog voldoet aan de bepalingen van het Vlaams-Nederlands Maasafvoeroverdrag inzake waterafname uit de Maas. Indien de Vlaamse watervraag groter is dan het volgens het verdrag toegestane gebruik, wordt er een laagwaterstrategie gestart om het Vlaamse watergebruik te reduceren. De gevolgen (zowel economisch als niet-quantificeerbare) zijn als eindresultaat beschikbaar en kunnen gebruikt worden om de laagwaterstrategie te evalueren. In figuur 7 wordt deze methodologie schematisch voorgesteld.

Verschiedende laagwaterstrategieën zijn in het onderzoek tegenover elkaar geëvalueerd. Hiervoor werd de verwachte economische schade (aantal €) door beperkte waterbeschikbaarheid als criterium gehanteerd. Voor niet kwantificeerbare effecten werd de duur (aantal dagen) van de beperkte waterbeschikbaarheid als indicator gehanteerd.

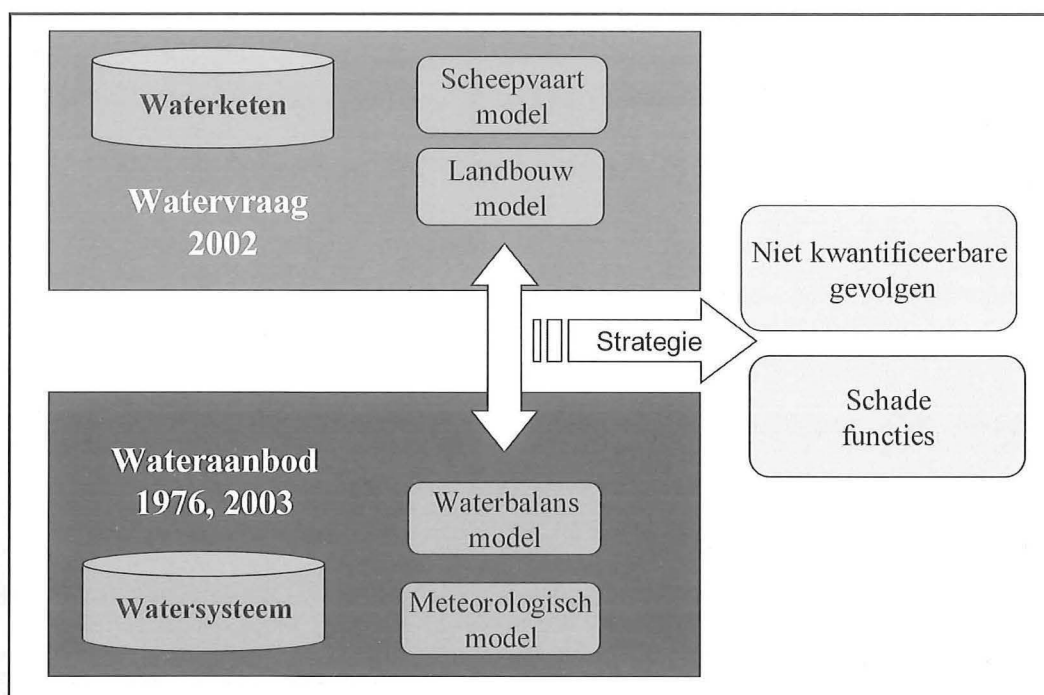
CONCLUSIES

Door het ontwikkelde model is het inzicht in de afhankelijkheid van Vlaanderen van Maaswater vergroot en werden de effecten van verschillende mogelijke maatregelen geïdentificeerd.

Uit de berekeningen blijkt dat er niet zoiets bestaat als een optimale laagwaterstrategie, universeel toepasbaar voor alle watertekortperiodes. Voor elke watertekortperiode bestaat wel een bepaald optimum, maar aangezien niet te voorspellen is hoe lang en hoe ernstig een watertekortperiode zal zijn, is het niet opportuun op voorhand één bepaalde strategie te selecteren. In de praktijk zal de watercoördinator tijdens een watertekortperiode de waterbesparende maatregelen afstemmen op de op dat ogenblik geldende hydrologische situatie door te kiezen voor een strategie die daarbij het beste aansluit. Doordat verschillende mogelijke strategieën vooraf werden onderzocht kan de beheerder op dat ogenblik een beter onderbouwde keuze maken.

Uit het onderzoek blijkt duidelijk de grote Vlaamse afhankelijkheid van Maaswater. Zo blijkt dat een watertekortperiode zoals deze van 1976 ernstige, verstreckende gevolgen zal hebben onder de huidige omstandigheden. In het geval er geen pomp-

Figuur 7. Schematische voorstelling van het gebruikte model



installaties geïnstalleerd staan op de sluiscomplexen van het Albertkanaal (om een groot deel van het schutwater terug te pompen tijdens een dergelijke periode) moet er gekozen worden tussen 2 alternatieven die beiden zeer verstrekende indirecte gevolgen hebben. Aan de ene zijde zou een stopzetting van de scheepvaart gedurende meer dan 100 dagen kunnen optreden waarbij een groot deel van het economische netwerk ernstige gevolgen zou ondervinden. Indien hier echter niet voor gekozen wordt, zouden de drinkwaterreserves gedurende 100-tal dagen uitgeput geraken en de elektriciteitsvoorziening vanuit de elektriciteitscentrales van Electrabel te Mol en Genk en enkele grote bedrijven (Ford Genk, Tessenderlo Chemie, ...) gedurende 90 tot 100 dagen moeten worden stilgelegd. Dit is echter in het louter theoretische geval dat er te allen tijde strikt aan de bepalingen van het Maasafvoer-verdrag moet worden voldaan. In de praktijk zal het echter nog wel mogelijk zijn om het aantal dagen waarop deze gevolgen optreden enigszins in te korten doordat er aan Nederlandse zijde reeds pompinstallaties geïnstalleerd staan. In de aanloop van een watertekortperiode zijn zij bereid de resterende pompcapaciteit tijdelijk in te zetten om tegen vergoeding hun watervraag verder te reduceren dan strikt noodzakelijk volgens het Maasafvoeroverdrag.

Met de installatie van pompen op de sluiscomplexen zijn echter niet alle problemen opgelost. Er zijn nog verscheidene andere maatregelen mogelijk, zoals het aanleggen van waterreserves of het verminderen van de watervragen, waarmee de schade aanzienlijk kan worden beperkt.

Een operationeel beheer van het kanalenstelsel dat nog meer afgestemd is op de actuele watervraag kan eveneens nog zorgen voor een aanzienlijke beperking van de schade. Het model onderschat nu wellicht de werkelijke optredende schade doordat de gesimuleerde Vlaamse watervraag kleiner is dan de werkelijke (zie figuur 6 en tabel 2). Dit is voornamelijk het gevolg van het verschil tussen theorie en praktijk: er wordt in de praktijk meer water doorgelaten dan wat theoretisch gezien strikt noodzakelijk is. Wanneer de waterbalansen in het kanalenstelsel op een meer permanente basis zouden worden opgevolgd, zijn wellicht nog besparingen door te voeren zonder verstrekende gevolgen. Het ontwikkelde model-instrumentarium vormt daarbij een goede vertrek-basis en zou verder ontwikkeld kunnen worden tot een operationeel hulpmiddel dat tevens ondersteuning kan bieden aan de waterbeheerder die tijdens periodes van watertekorten moeilijke beslissingen moet nemen.

REFERENTIES

Baetens J. & Van Eerdenbrugh K. (2005), Watersysteem van het Albertkanaal en de Kempense

kanalen – inventarisatie voor de opmaak van zoetwaterstrategieën. Rapport nr. 720_04. UA-Ecosystem Management Research Group in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium.

Baetens J., Peeters P. & Van Eerdenbrugh K. (2006a), Watersysteem van het Albertkanaal en de Kempense kanalen – opmaak van een model-instrumentarium voor de ontwikkeling van laagwaterstrategieën. Rapport nr. 724_02. UA-Ecosystem Management Research Group in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium.

Baetens J., Peeters P. & Van Eerdenbrugh K. (2006b), Watersysteem van het Albertkanaal en de Kempense kanalen – opstellen van verschillende mogelijke laagwaterstrategieën. Rapport nr. 727_01/2b. UA-Ecosystem Management Research Group in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium.

Baetens J. & Meulenijzer P. (2006), Debietmetingen van de watervangsystemen op het Albertkanaal en de Kempische kanalen. Rapport nr. 792_16. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium, in opdracht van N.V. De Scheepvaart, Afdeling Exploitatie.

Elsen F., Ghesquire U. & Willems E. (2005), Opmaak van laagwaterstrategieën – waterverbruik van landbouwgewassen. Rapport nr. 727_01/3. Bodemkundige Dienst van België, in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium.

IMDC & RA (2006), Watersysteem van het Albertkanaal en de Kempense kanalen – opmaak van laagwaterstrategieën – bepalen van maatschappelijke acceptatie en kosten-baten van de mogelijke maatregelen. Rapport nr. 727_01/2a. IMDC i.s.m. Resource Analysis, in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Waterbouwkundig Laboratorium.

J. Baetens^{1,2}, T. Scheltjens³, K. Van Eerdenbrugh², P. Peeters², C. Danckaerts⁴, K. Maeghe⁴, P. Meire¹ en F. Mostaert²

¹ Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer, Universiteit Antwerpen,

Universiteitsplein 1, Wilrijk 2610, België

² Waterbouwkundig Laboratorium, Vlaamse Overheid,

Berchemlei 115, Borgerhout 2140, België

³ Resource Analysis NV,

Wilrijkstraat 37-45, Antwerpen 2140, België

⁴ De Scheepvaart NV,

Havenstraat 44, Hasselt 3500, België

contact: johan.baetens@mow.vlaanderen.be

Impact van klimaatverandering op hydrologische extremen langs Vlaamse rivieren - testcase Dender

¹ Katholieke Universiteit Leuven,
Afdeling Hydraulica

² International Marine and Dredging
Consultants (IMDC) nv

³ Vlaamse Overheid, Water-
bouwkundig Laboratorium

In het kader van twee lopende onderzoeksprojecten wordt de impact bestudeerd van klimaatverandering op het risico van hydrologisch uitzonderlijke gebeurtenissen langs Vlaamse waterlopen. De onderzochte hydrologische extremen omvatten zowel perioden van hoge neerslagafstroming en dus overstromingsgevaar, als droge perioden met uitzonderlijk lage afvoer.

Eerste resultaten zijn bekomen voor de Dender als testcase. Door de sterke daling in de zomerneerslag en de toename in de verdamping, daalt het debiet aanzienlijk. Tijdens droge zomers kunnen de laagste grondwaterafstromingen naar de rivier met meer dan 50% dalen. Het is duidelijk dat dit de kans op watertekorten aanzienlijk kan doen toenemen, wat nadelige gevolgen kan hebben voor de drinkwaterproductie, de diepgang voor de scheepvaart, voor de waterkwaliteit, enz. De toename van de kans op overstromingen, die vaak met klimaatverandering wordt geassocieerd, blijkt uit de resultaten minder duidelijk.

Inleiding

In twee lopende studies bestudeert de Afdeling Hydraulica van de Katholieke Universiteit Leuven hoe de verwachte klimaatverandering de waterhuishouding langs Vlaamse rivieren zal beïnvloeden. In een eerste studie (CCI-HYDR project) voor Federaal Wetenschapsbeleid worden in samenwerking met het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) zogenaamde klimaatveranderingsscenario's voor België afgeleid. Deze worden in een tweede studie voor het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid gebruikt om de invloed te bestuderen op overstromingskansen en watertekorten langs Vlaamse rivieren. Eerste resultaten geven reeds duidelijke indicaties naar de waterbeheerders.

Keuze van geschikte klimaatveranderingsscenario's

Hydrologische impactanalyse van klimaatverandering vereist schattingen van de toekomstige evoluties in de hoeveelheid neerslag en verdamping ten gevolge van de opwarming van de aarde door de toenemende uitstoot van broeikasgassen. Deze schattingen gebeuren op basis van klimaatmodellen. In het CCI-HYDR project zijn door het KMI (ir. E. Roulin, dr. P. Baguis) simulatieresultaten met tien regionale Europese klimaatmodellen verwerkt. Deze zijn gebruikt om schattingen te maken van de toename in de neerslag

en de mogelijke verdamping (de potentiële evapotranspiratie) tot het jaar 2100. Deze schattingen zijn gebaseerd op aannamen die de Intergouvernementele Werkgroep rond Klimaatverandering (IPCC) heeft gemaakt voor de toekomstige evoluties in de uitstoot van broeikasgassen (IPCC, 2001, 2007). Deze aannamen zijn gebaseerd op toekomstverwachtingen van de evolutie van de wereldeconomie, van de bevolkingstoename, van het gebruik van materialen, van energiebronnen, enzovoort. Deze evolutie kan meer of minder duurzaam verlopen, al dan niet sterk rekening houdend met ecologische aspecten, en meer mondiaal of meer regionaal georiënteerd. Als gevolg hiervan kunnen de concentraties van de broeikasgassen in de atmosfeer verder blijven toenemen tot het jaar 2100 met in het meest pessimistisch scenario een verdrievoudiging van de CO₂ uitstoot. Een ander scenario is dat deze eerst toenemen tot het midden van de volgende eeuw en daarna opnieuw dalen.

Afhankelijk van het veronderstelde fysisch gedrag van de atmosfeer en zijn interacties met de oceanen en het land en de verdere evolutie in de uitstoot van de broeikasgasemissies, kan de neerslag in de wintermaanden met 16% toenemen tegen het jaar 2100 (zie Tabel 1). Dit wordt het "hoog scenario" genoemd. Het "middenscenario" gaat uit van 8% toename, en het "laag scenario" van ongewijzigde neerslagvolumes. Tijdens de zomermaanden neemt de neerslag in totaal volume af (tussen 6% en 20%, afhankelijk van het

Tabel 1: Percentage toename in de neerslagvolumes en mogelijke verdampingsvolumes tot 2100, afzonderlijk voor de hydrologische winter- en zomerseizoenen.

Variabele	Seizoen	Laag scenario	Middenscenario	Hoog scenario
Neerslagvolumes	Winter	0% toename	8% toename	16% toename
	Zomer	20% afname	13% afname	6% afname
Mogelijke verdampingsvolumes	Winter	6% toename	17% toename	27% toename
	Zomer	4% toename	15% toename	25% toename

scenario). De intensiteit van de zomerbuien zal toenemen, maar het aantal buien zal wijzigen. Bovendien zal er beduidend meer water verdampen, zowel in de winter als de zomer. Meer details over de afleiding van deze scenario's kunnen gevonden worden in het rapport bij de studie (Boukhris et al., 2006), of samenvattend in het recent artikel van Willems et al. (2007).

Een testcase in het Denderbekken

Om de invloed te onderzoeken van de klimaatverandering op de afvoer van water of het debiet in Vlaamse rivieren is de Dender als voorbeeld gekozen. Hierbij zijn de hydrologische en hydrodynamische modellen gebruikt die in het verleden zijn opgebouwd door de Afdeling Hydraulica van de K.U.Leuven in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) van de Vlaamse Overheid.

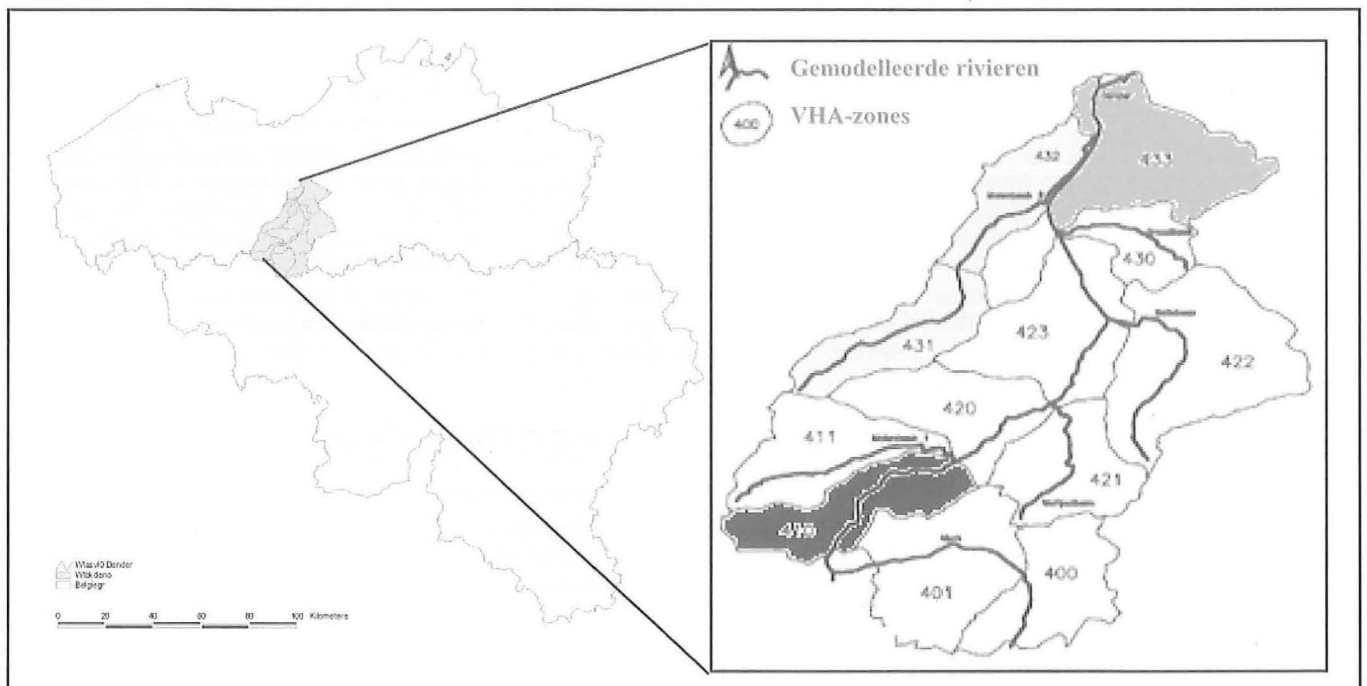
Door Rombauts & Willems (2004) zijn hydrologische modellen afgeijkt voor elk van de 12 deelbekkens in het Denderbekken (zie Figuur 1). Dit is in eerste instantie gedaan voor de deelbekkens opwaarts van de acht debietmeetstations beschikbaar in het bekken. Daarna zijn de parameters van het hydrologisch model vastgelegd voor de andere onbemetende deelbekkens op basis van empirische verbanden tussen de modelparameters en gebiedseigenschappen. De neerslaginvoerreeksen voor de hydrologische modellen zijn bepaald op basis van lokale neerslagmeetreeksen en de hydrologische modellen gecalibreerd en gevalideerd op basis van de debietmeetreeksen voor historisch beschikbare meetperioden vanaf 1986. De hydrologische modellen zijn daarna doorerekend voor de vol-

ledig beschikbare historische meetreeksen van neerslag vanaf 1967, extreme-waarden-analyses uitgevoerd op de gesimuleerde tijdreeksen van neerslagafstromingsdebieten, en de voorkomingskansen bepaald van welbepaalde kritieke hoogwater- en laagwaterdebieten. Al deze modelleringen en analyses zijn doorgevoerd conform de algemene modelleringsmethodologie van Willems et al. (2000) zoals toegepast bij het WL.

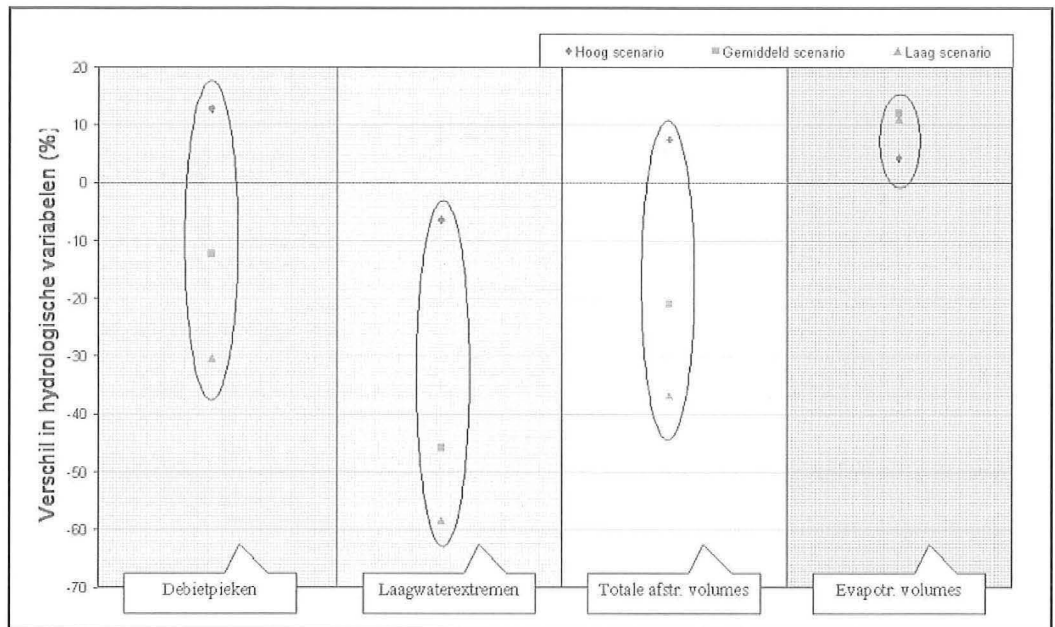
Om de impact van klimaatverandering door te rekenen, zijn het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario toegepast op de invoer in de modellen van uurlijkse neerslag en mogelijke verdamping. De methode is toegepast voor drie deelbekkens met variërende gebiedseigenschappen (Figuur 1). Het deelbekken van de Molenbeek langs Geraardsbergen (zone 410 in de Vlaamse Hydrografische Atlas (VHA)) is een stedelijk deelbekken met beperkte ruimtelijke topografische variaties en een leem-ondergrond. VHA-zone 433 van de Vondelbeek langs Opwijk heeft de meest vlakke topografie, en omvat gedeelten van de steden Aalst en Dendermonde. VHA-zones 431 en 432 van de Molenbeek langs Erpe-Mere beslaan een landelijk gebied met een ruime landbouwoppervlakte en een relatief steile topografie. Door vergelijking van de impactresultaten voor deze drie deelbekkens, wordt een indicatie bekomen van de ruimtelijke variaties in de impactresultaten ten gevolge van ruimtelijke verschillen in gebiedseigenschappen zoals topografie en landgebruik. Voor de drie deelbekkens is de impact van klimaatverandering doorerekend tot het jaar 2100.

De effecten op de piekafvoeren zijn geanalyseerd versus de gemiddelde herhalingsperiode (vb. de piekafvoeren die gemiddeld eenmaal per 10 jaar,

Figuur 1. De drie geselecteerde deelbekkens in het Denderbekken.



Figuur 2. Gemiddeld percentage verschil in hydrologische impact op basis van vier hydrologische modelvariabelen voor deelbekken 410 en het midden, laag en hoog scenario (klimaat 2100).



50 jaar, 100 jaar, enz. voorkomen). De piekafvoeren zijn hierbij geëxtraheerd uit de volledige tijdreeks van uurlijkse simulatieresultaten met het hydrologisch model, gebruik makend van hydrologische onafhankelijkheidscriteria. Ook is de impact bestudeerd voor de uurlijkse laagwaterextremen, de cumulatieve neerslagafstromingsvolumes, de infiltratie- en percolatievolumes, de cumulatieve volumes en piekdebieten voor de oppervlakte-afstroming en grondwaterafstroming, de werkelijke verdampingsvolumes, enz. Voor vier van deze variabelen zijn in Figuur 2 het gemiddeld percentage wijziging weergegeven van het huidige klimaat naar het verwachte klimaat in 2100, volgens het midden, laag en hoog klimaatveranderingsscenario.

Uit de resultaten blijkt dat de cumulatieve neerslagafstromingsvolumes afnemen, alsook de verdampingsvolumes en de laagwaterdebieten. De toename van de kans op overstromingen, die vaak met klimaatverandering wordt geassocieerd, blijkt uit de resultaten minder duidelijk.

De grote onzekerheid in de hydrologische impactresultaten is het gevolg van de sterke verschillen tussen het hoog, midden en laag klimaatveranderingsscenario; deze worden veroorzaakt door de sterke verschillen in de simulatieresultaten met de verschillende klimaatmodellen en de onzekerheid in de toekomstige uitstoot van broeikasgassen.

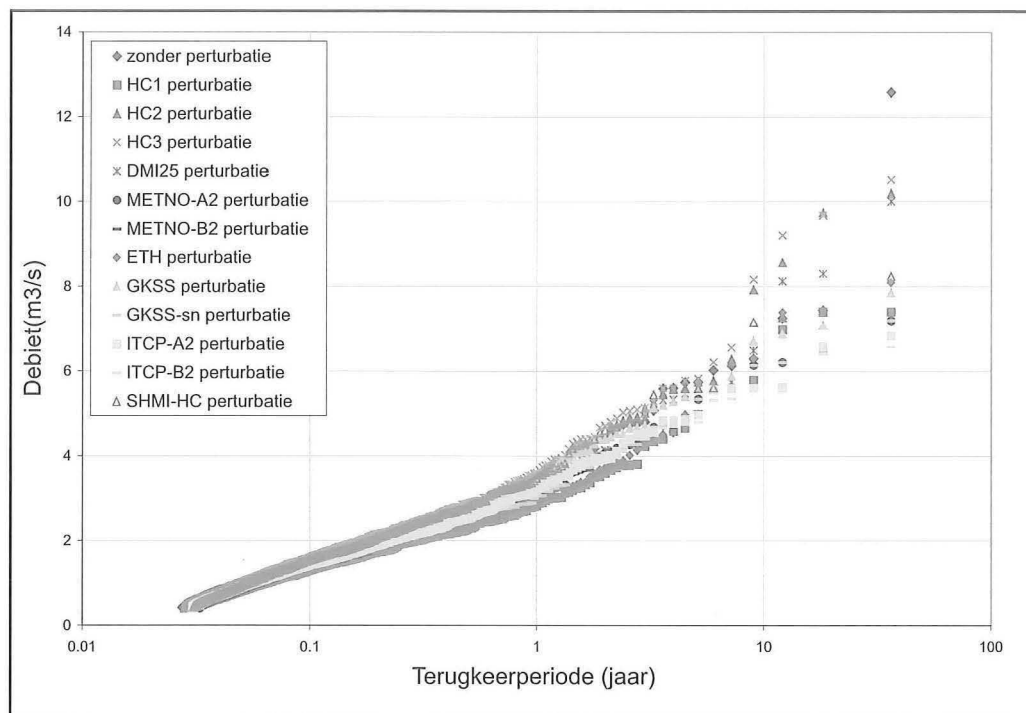
Figuur 3 geeft het verband weer tussen de uurlijkse piekafvoeren en de terugkeerperiode (de gemiddelde herhalingstijd) voor verschillende klimaat-simulaties. Voor de extreme debietpieken wordt zowel een stijging als een daling teruggevonden, afhankelijk van de verhouding van de toename in de winterneerslag versus de afname in de zomerneerslag, en van de relatieve verhouding van de trends in de neerslag versus de toename

in de verdamping. Deze relatieve verhoudingen blijken sterk te wijzigen van klimaat-simulatie tot -simulatie. In het meest extreme scenario nemen de piekafvoeren met 15% toe.

Voor de extreme laagwaterdebieten wordt er voor alle scenario's een duidelijke daling (tot meer dan 50% in de uurlijkse laagwaterextremen) vastgesteld. Dit is ook geldig voor grotere tijdschalen en is gerelateerd aan de daling in de cumulatieve neerslagvolumes, veroorzaakt door de daling in de zomerneerslag en de stijging in de verdamping. Het is duidelijk dat deze significante daling in de laagwaterdebieten belangrijke consequenties kan hebben voor de toekomstige beschikbaarheid van water. Dit kan nadelige gevolgen hebben voor de drinkwaterproductie, de diepgang voor de scheepvaart, voor de waterkwaliteit, enz.

Wanneer de resultaten van de drie deelbekkens, met sterk verschillende gebiedseigenschappen, maar in hetzelfde Denderbekken, worden geanalyseerd, blijkt dat de resultaten van de hydrologische impactresultaten voor alle deelbekkens zeer gelijklopend zijn. In alle gevallen voorspelt het ECC-klimaatmodel van het Deens Meteorologisch Instituut de grootste impact op de neerslagafstromingsvolumes. Dalingen tot 75% worden teruggevonden voor de cumulatieve neerslagafstromingsvolumes in deelbekkens 433 en 431+432. Dit wordt veroorzaakt door de sterke toename in verdampingsvolumes met +35% in de winter en +40% in de zomer voor dit model. In vergelijking met de andere klimaatmodellen voorspellen de modellen van het Hadley Centre in de UK meer gematigde variaties in neerslagafstromingsvolume, maar toch nog oplopend tot een daling van 20% in de deelbekkens 433 en 431+432. Wat de invloeden op de hydrologische modelvariabelen betreft, blijkt dat de invloed op de piekdebieten en de andere

Figuur 3. Uurlijkse piekafvoeren versus terugkeerperiode voor deelbekken 410 voor en na perturbatie van de neerslag en verdamping volgens de simulaties met verschillende klimaatmodellen (klimaat 2100).



hydrologische variabelen het grootst is voor deelbekken 433, door de hoge verstedelijkingsgraad van dit deelbekken (meer verharding). Resultaten zijn dus in ieder geval sterk afhankelijk van gebiedseigenschappen en dus ruimtelijk sterk variabel. In de vervolgstudie voor het WL wordt dit verder onderzocht.

Leren uit het verleden

Naast een voorspelling van de toekomstige evoluties, wordt ook een analyse gemaakt van de veranderingen in het recente verleden. Klimaatverandering door toename in broeikasgassen is immers meer dan een eeuw aan de gang, en is vooral sinds een dertigtal jaar duidelijk merkbaar in de toename van de temperatuur. Op basis van een unieke dataset van het KMI met meer dan 100 jaar neerslaggegevens te Ukkel, zijn door Blanckaert & Willems (2006) recente trends onderzocht in de neerslag. Hieruit blijkt dat de neerslaghoeveelheden in de winter in kleine mate, maar duidelijk, zijn toegenomen vanaf de jaren 90. Twee fenomenen blijken hier een rol te spelen. Enerzijds zijn er periodieke schommelingen in de neerslag. Tijdens de laatste 107 jaar zijn er in Ukkel perioden voorgekomen met meer extreme regenbuien zoals in de jaren 1910 en 1920, de jaren 60 en recent tijdens de laatste 15 jaar. Dit moet nog verder onderzocht worden, maar eerste resultaten duiden op een 30jarige cyclus. Mogelijks is sinds kort een dalende trend ingezet. Ondanks de invloed van deze langjarige schommelingen is ook te zien dat de neerslag de laatste vijftien jaar is toegenomen tijdens de wintermaanden.

Gevaar vanuit zee

Gegevens over het mogelijke effect van klimaatwijzigingen op het niveau van de zeespiegel zijn al langer bekend. Tijdens de 21ste eeuw wordt een stijging van de zeespiegel van 10 à 90 cm verwacht (IPCC, 2001). Ook hier zijn de onzekerheden nog groot. In grootteorde zal de zeespiegelstijging de eerste 50 jaar met dezelfde snelheid als nu evolueren (tussen 0.1 cm en 0.25 cm per jaar) en dan sterk toenemen in de tweede helft van de eeuw. De toename van het overstromingsgevaar is in Vlaanderen dus vooral vanuit de zee te verwachten eerder dan door de toename van neerslag in het binnenland.

Invloed op het waterbeheer

De studie geeft nieuwe inzichten in de effecten van toekomstige klimaatverandering. Het is duidelijk dat bij toekomstige ontwerpen en/of maatregelen voor waterbeheer best rekening wordt gehouden met de invloed van mogelijke klimaatverandering. Hiertoe is een methode voorgesteld waarbij drie simulaties worden uitgevoerd: op basis van een midden, hoog en laag scenario. Door het uitvoeren van deze drie simulaties en het vergelijken van de resultaten wordt een eerste indicatie bekomen van de onzekerheid in de hydrologische impactresultaten. Voor de toename in het overstromingsrisico door gewijzigde patronen in neerslag en verdamping zijn de onzekerheden nog zeer groot. Daarom moeten de evoluties van het klimaat de volgende jaren verder nauwgezet opgevolgd worden, en moet bij nieuwe projecten voor waterbeheersing rekening gehouden worden met de mogelijkheid om preventieve maatregelen te nemen. Ook de verwachte pro-

blematische waterbeschikbaarheid in de zomer vraagt verdere aandacht.

De onzekerheid kan evenwel nog groter zijn, vb. indien de klimaatmodellen een aantal fysische processen die essentieel zijn voor het voorspellen van de lange-termijn trends en eventuele trendbreuken in het klimaat niet bevatten door beperkingen in de huidige wetenschappelijke kennis over het klimaat. Zoals door Kroonenberg (2006) is aangetoond voor het voorbeeld van de Kaspische Zee, blijkt het immers zeer moeilijk om trendbreuken in hydrometeorologische trends te voorspellen.

De afleiding van de klimaatveranderingsscenario's voor neerslag en verdamping zijn gebaseerd op de resultaten van klimaatmodellen voor een locatie dichtst bij Ukkel. In het CCI-HYDR project wordt nog verder onderzocht of deze scenario's regionale verschillen vertonen voor Vlaanderen en België. Voorlopig wordt verondersteld dat de scenario's afgeleid op basis van Ukkel geldig zijn voor het ganse Vlaamse gebied. Ook wordt in het CCI-HYDR project nog verder onderzocht of de veranderingen in extreme neerslag- en verdamping verschillen van de seizoensgemiddelde veranderingen, zoals in deze studie gebruikt, en hoe de methode voor de hydrologische impactanalyse van klimaatverandering overeenkomstig kan worden verrijkt.

In ieder geval blijkt nu reeds uit de resultaten dat de verminderde waterbeschikbaarheid in de zomer verdere aandacht vraagt. De waterbeheerders en de watergebruikers dienen anticiperend in te spelen op dreigende watertekorten. In dat kader werkt de Vlaamse Overheid laagwaterstrategieën uit, die bij periodes van lage afvoer kunnen toegepast worden om de schadelijke effecten van een laagwaterperiode zo klein mogelijk te houden. Verschillende laagwaterstrategieën worden tegenover elkaar geëvalueerd om een optimale set aan maatregelen uit te werken. Deze maatregelen gaan van het beperken van het watergebruik tot meer structurele ingrepen, zoals bijvoorbeeld het terugpompen van water aan de stuwen op de kanalen. Het afwegen van deze strategieën gebeurt door zowel de vermindering in watergebruik als de economische en maatschappelijke effecten onderling te vergelijken. Voor meer details over deze studie wordt verwezen naar het artikel "Gebruik van een beslissingsondersteunend systeem voor waterbeheer in het Albertkanaal en de Kempense kanalen tijdens periodes van watertekorten" (J.Baetens et al.) in dit nummer.

Ook bouwt de Vlaamse Overheid voorspellingscentra uit om zowel bij dreigende wateroverlast als bij dreigende watertekorten verwachtingen op te stellen. On-line metingen van neerslag en afvoer worden samen met weersvoorspellingen gebruikt in hydrologische en hydrodynamische riviermodellen. De resultaten van deze modellen worden gebruikt om een overzicht te krijgen van de te verwachten evoluties en de plaatsen waar overstromingen kunnen optreden.

Bij het beveiligen van de kustzone tegen overstromingsgevaar wordt met de verwachtingen over de toekomstige zeespiegelstijging gerekend (Verwaest et al., 2005). Er wordt vaak gewerkt met flexibele oplossingen die regelmatig onderhoud vergen. Een voorbeeld is de versterking van de zeewering door het opspuiten van zand op het strand. Bij elke 5 jaarlijkse onderhoudsbeurt, kan de bescherming geleidelijk anticiperen op de verwachte zeespiegelstijging.

Op sommige plaatsen wordt harde infrastructuur gebouwd, zoals dijken. Dan wordt er bij de ontwerp hoogte van de constructie een extra hoogte geteld volgens de verwachte levensduur ervan. Zo wordt voor een constructie die 50 jaar moet dienen, rekening gehouden met een zeespiegelrijzing van 20 cm. Over 100 jaar wordt met 60 cm gerekend. Ook in het nieuwe globale veiligheidsplan voor de Kust, dat wordt ontworpen, wordt met de verwachte zeespiegelstijging rekening gehouden.

Bij de herziening van het beveiligingsplan van het getijdengebied van de Schelde (het Sigmaplan) is de aanpak gelijkaardig. Toekomstige overstromingsrisico's werden bepaald met de verwachte effecten van de zeespiegelrijzing op de waterstanden en dus ook op overstromingskansen (Meyvis et al., 2003; MKBA, 2005). Het recent door de Vlaamse regering goedgekeurde herziene Sigmaplan houdt nu al preventief rekening met de meest pessimistische verwachtingen

Meer details over de lopende studies over de hydrologische impactanalyse van klimaatverandering voor Vlaanderen kan gevonden worden op: <http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR>

Referenties

Boukhris, O., Willems, P., Berlamont, J., 2006. "Opstellen van een methode voor het inrekenen van de klimaatverandering in de compositiehydrogrammethode – Algemeen rapport", Rapport MOD 706/10-1 van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, door Afdeling Hydraulica K.U.Leuven i.s.m. IMDC, eindrapport november 2006, 74 p.

Blanckaert, J., Willems, P., 2006. "Opstellen van een methode voor het inrekenen van de klimaatverandering in de compositiehydrogrammethode – Analyse trends en cycli", Rapport MOD 706/10-2 van het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, door IMDC en Afdeling Hydraulica K.U.Leuven, eindrapport november 2006, 83 p.

IPCC, 2001. "Third Assessment Report", Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.

IPCC, 2007. "Fourth Assessment Report", Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

Kroonenberg, S., 2006. "De menselijke maat – De aarde over tienduizend jaar", Uitgeverij Atlas, Amsterdam/Antwerpen.

Meyvis, L., Graré, W., Dauwe, W., 2003. "Actualisatie van het Sigmaplan", Tijdschrift Water, september 2003.

MKBA (2005). "Maatschappelijke Kosten Baten-analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan: Conclusies op hoofdlijnen", Tijdelijke vereniging Resource Analysis, IMDC, Grontmij en Ecolas en Vito in opdracht van Afdeling Zeeschelde.

Rombauts, S., Willems, P., 2004. "Inventarisatie, Opmaak van numerieke hydrologische modellen en opstellen van composiethydrogrammen voor het Denderbekken", Rapport door Afdeling Hydraulica K.U.Leuven in opdracht van AWZ - Afdeling waterbouwkundig laboratorium en hydrologisch onderzoek, i.s.m. IMDC, Bestek nr. 16EB/02/19, 5 deelrapporten, april 2004.

Verwaest, T., Viaene, P., Verstraeten, J., Mostaert, F., 2005. "De zeespiegelstijging meten, begrijpen en afblokken", De Grote Rede, 15, 15-25.

Willems, P., Qvick, A., Vaes, G., Berlamont, J., Christiaens, K., Feyen, J., 2000. "Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen", Rapport door K.U.Leuven in opdracht van AWZ – Afdeling waterbouwkundig laboratorium en hydrologisch onderzoek, april 2000.

Willems, P., Boukhris, O., Berlamont, J., Blanckaert, J., Van Eerdenbrugh, K., Viaene, P., 2007. "Impact van klimaatverandering op Vlaamse rivieren", Het Ingenieursblad, 29, Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging (KVIV), januari 2007, 28-33.

Patrick Willems¹
Postdoctoraal onderzoeker FWO-Vlaanderen en
gastdocent K.U.Leuven

Omar Boukhris¹
Doctorandus K.U.Leuven

Jean Berlamont¹
Gewoon hoogleraar K.U.Leuven

Joris Blanckaert²
Ingenieur IMDC

Katrien Van Eerdenbrugh³
Ingenieur Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaamse Overheid

Peter Viaene³
Ingenieur Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaamse Overheid

¹ Katholieke Universiteit Leuven, Afdeling
Hydraulica
Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee
(Leuven), tel. 016 32 16 58, fax 016 32 19
89, E-mail: Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be

² International Marine and Dredging
Consultants (IMDC) nv.
Wilrijkstraat 37-45 bus 4, 2140 Antwerpen,
tel. 03 270 92 95, fax 03 235 67 11, E-mail:
joris.blanckaert@imdc.be

³ Waterbouwkundig Laboratorium, Departement
Mobiliteit en Openbare Werken,
Vlaamse Overheid
Berchemlei 115, 2140 Borgerhout, tel. 03 224
61 93, fax 03 224 60 36, E-mail:
katrien.vaneerdenbrugh@mow.vlaanderen.be

Bepaling van risicozones voor overstromingen in niet-gemodelleerde gebieden

De Vlaamse overheid maakt overstromingskaarten aan gebaseerd op hydrologische en hydraulische modellering voor de belangrijkste waterlopen. Waar een dergelijke modellering niet wordt toegepast, zijn er kaarten beschikbaar met een aanduiding van recent overstroomde gebieden (ROG). Deze informatie m.b.t. recente overstromingen geeft echter geen informatie over de werkelijke overstromingsrisico's, omdat er geen kans van voorkomen aan is gekoppeld. Om aan deze problemen tegemoet te komen werd een methodologie ontwikkeld om een meer nauwkeurige bepaling uit te voeren van de risicozones voor overstromingen voor niet gemodelleerde gebieden. Deze methodologie is enerzijds gebaseerd op een statistische analyse van hoge waterstanden en anderzijds op de extrapolatie van deze waterstanden naar de omliggende terreinen op basis van een Digitaal HoogteModel. Deze methodologie werd uitgewerkt in opdracht van de gemeente Knokke-Heist voor de Isabellavaart. Het resultaat omvat overstromingskaarten bij verschillende terugkeerperioden, waarbij de locaties, grootte en vorm van de risicozones voor overstromingen beter worden geïdentificeerd.

Situering

De Vlaamse overheid maakt overstromingskaarten aan gebaseerd op hydrologische en hydraulische modellering voor de belangrijkste waterlopen [AGIV, 2006]. Waar een dergelijke modellering niet wordt toegepast, zijn er kaarten beschikbaar met een aanduiding van recent overstroomde gebieden (ROG). Deze informatie m.b.t. recente overstromingen geeft echter geen informatie over de werkelijke overstromingsrisico's omdat er geen kans van voorkomen aan is gekoppeld [CIW, 2004]. Bovendien zijn deze ROG gebieden zeer ruw aangeduid. Recent werden de risicokaarten door de Vlaamse overheid heringetekend op basis van topografische informatie (ROGDHM-kaart), waardoor ze al enigszins realistischer lijken [AGIV, 2006; Vlaamse Overheid, 2006].

Methodologie

Om aan deze problemen tegemoet te komen werd een methodologie ontwikkeld om een meer nauwkeurige bepaling uit te voeren van de risicozones voor overstromingen voor niet gemodelleerde gebieden. Deze methodologie is enerzijds gebaseerd op een statistische analyse van hoge waterstanden of extreme waarden analyse van waterstanden in de betreffende waterloop en anderzijds op de extrapolatie van deze waterstanden naar de omliggende terreinen op basis van een Digitaal HoogteModel (DHM). Hiervoor is het nodig om te beschikken over een voldoende lange tijdreeks van waterstanden in het betreffende afwateringssysteem. Verder kan op basis van inter- en extrapolatie van waterpeilmetingen en de werking van allerhande regelstructuren ook rekening worden gehouden met het verhang langsheen de betreffende waterloop. Het is op basis van dit verhang dat de inter- of extrapolatie van een lange tijdreeks van waterstanden naar alle locaties langsheen de waterloop kan worden uitgevoerd.

Toepassing

Deze methodologie werd uitgewerkt in opdracht van de gemeente Knokke-Heist voor de Isabellavaart (Zwinpolder). Het resultaat omvat overstromingskaarten bij verschillende terugkeerperioden, waarbij vooral de grootte en vorm van de risicozones voor overstromingen sterk verschillen ten opzichte van de ROG kaarten. Bovendien werden een aantal bijkomende risicozones geïdentificeerd.

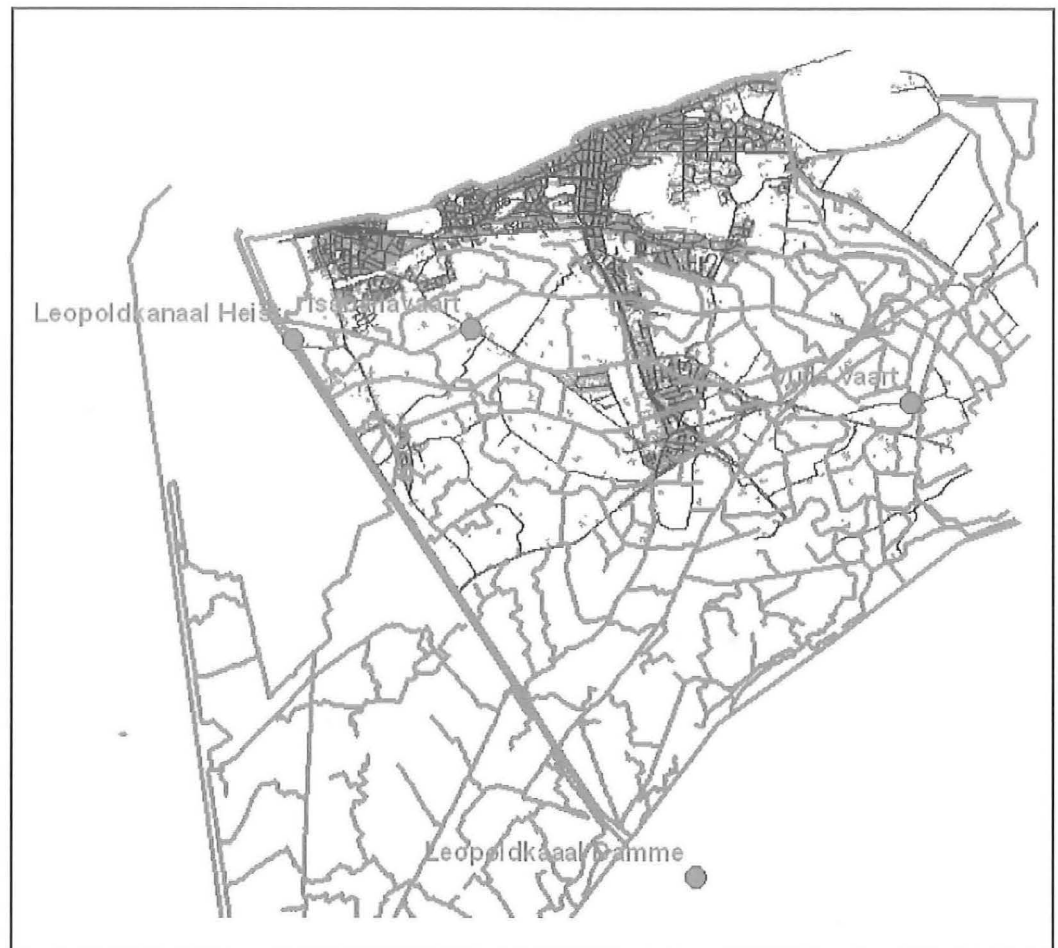
Meetlocaties

De gebruikte metingen omvatten twee waterhoogtemetingen op het Leopoldkanaal, één op de Isabellavaart en één op de Vuilevaart (ter beschikking gesteld door het Hydrologisch Informatiecentrum HIC). De langste tijdreeks is die op de Vuilevaart (12 jaar), deze reeks wordt als referentie gebruikt.

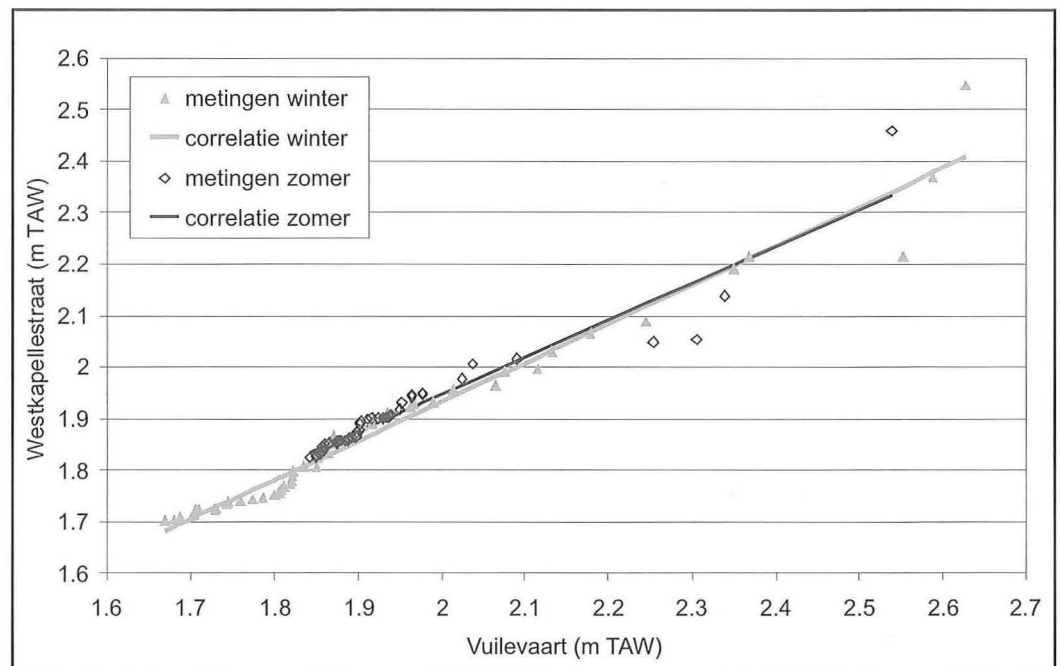
Correlaties

Via correlaties tussen de meetpunten worden de correcties berekend op de waterhoogtemetingen, welke nodig zijn om de lange tijdreeks te transponeren naar een andere locatie. Hierdoor kan er op iedere locatie een geïnterpoleerde lange tijdreeks worden gecreëerd. Verder wordt ook de invloed van de stuw met terugslagkleppen in de waterstanden ingewerkt.

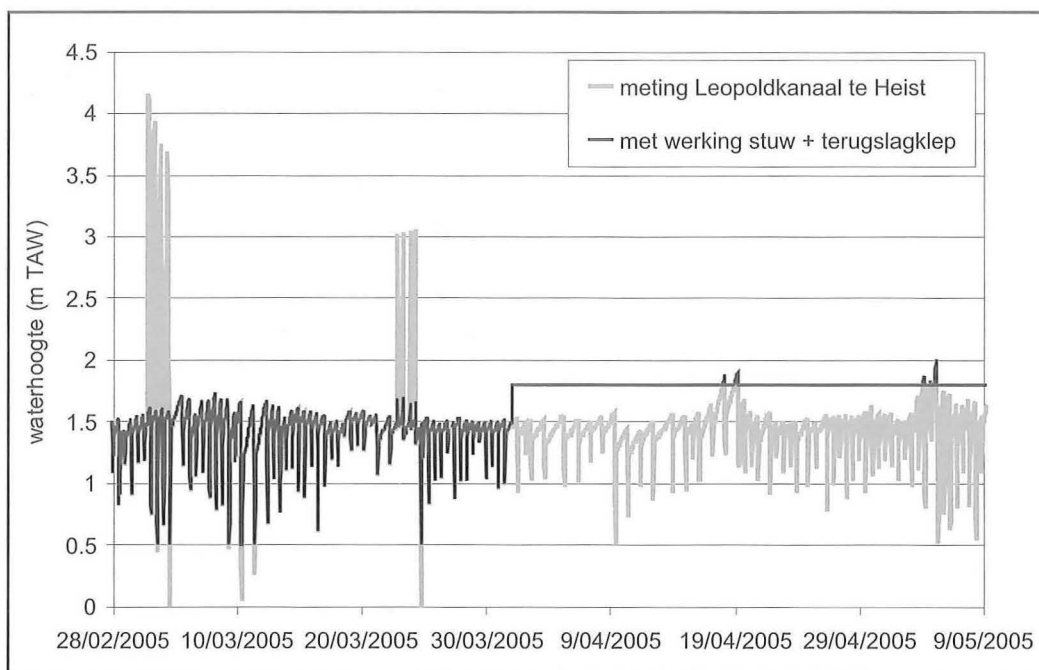
Figuur 1 : ligging van het stroomgebied van de Isabellavaart (rood omlijkende zone) en de meetpunten (rode cirkels).



Figuur 2 : Correlatie tussen de piekwaterhoogten van twee meetpunten.



Figuur 3 : Resultaat van het conceptueel model m.b.t. de invloed van de stuw op de waterhoogte.



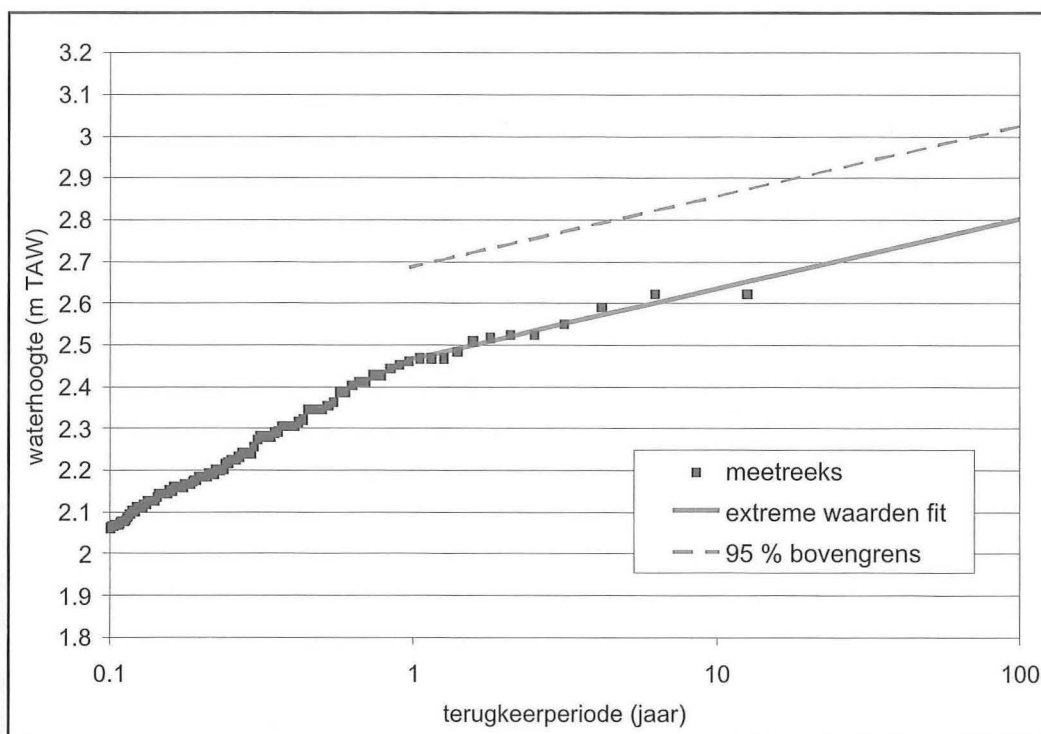
Extreme waarden analyse

Voor verschillende locaties langsheen de waterloop wordt een extreme waarden analyse uitgevoerd op de geïnterpoleerde waterstanden [Berlamont et al., 2000]. Op basis van deze extreme waarden analyses wordt voor verschillende terugkeerperioden de bijbehorende waterhoogte bepaald in de verschillende locaties langsheen de waterloop.

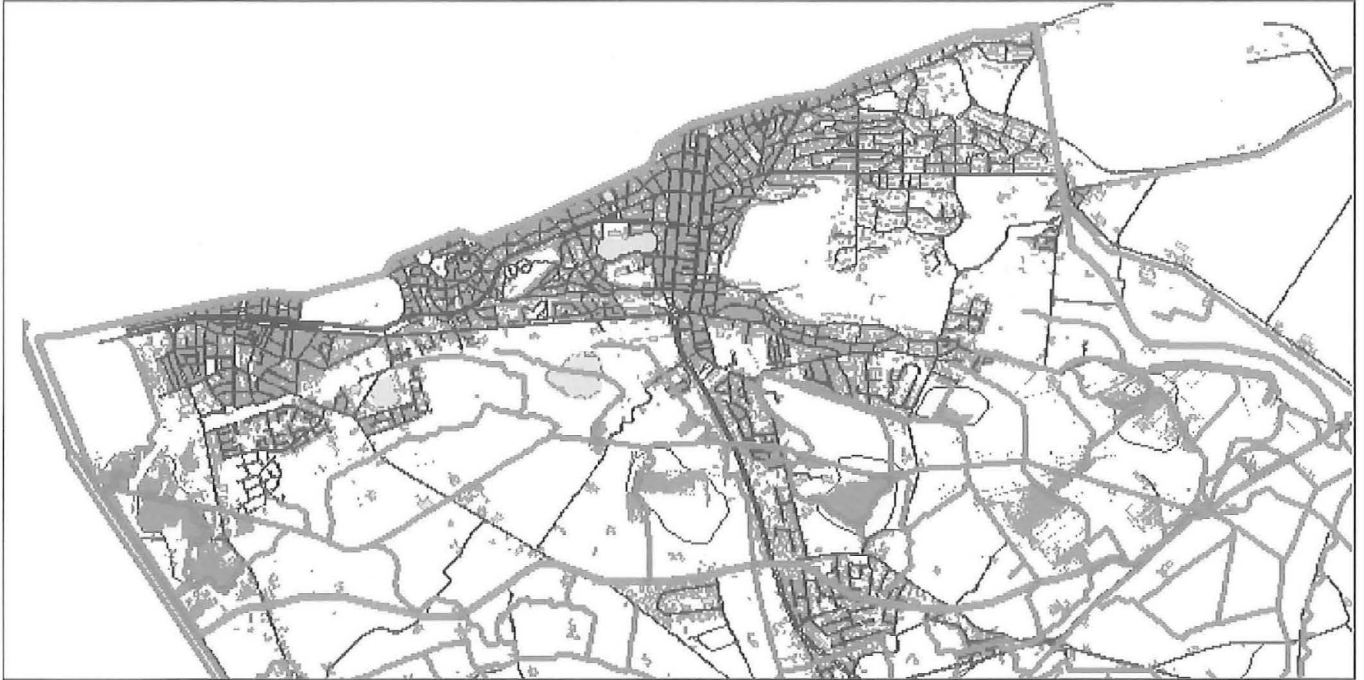
Risicokaarten

Op basis van de waterhoogten voor een welbepaalde terugkeerperiode kan een risicokaart voor overstromingen worden opgesteld. De gele gebieden op onderstaande kaart zijn de ROG-zones [AGIV, 2006]. De rode zones geven de risicozones aan. Na het uitvoeren van deze studie werden de risicokaarten door de Vlaamse overheid heringetekend op basis van topografische informatie zodat de overeenkomst beter is

Figuur 4 : Extreme waarden verdeling voor één van de locaties langsheen de Isabellavaart (de 95 % bovengrens is een inschatting van de onzekerheid op het resultaat).



Figuur 5 : Risicozones voor overstromingen langs de Isabellavaart voor een terugkeerperiode van 100 jaar (in rood de zones zoals bepaald in de studie van HydroScan, in geel de oorspronkelijke kaarten van de Vlaamse overheid).



(ROGDHM-kaart), maar er blijven significante verschillen [AGIV, 2006]. De ROGDHM-kaart houdt immers geen rekening met de hydraulica van de waterlopen [Vlaamse Overheid, 2006]. Bovendien werden in de studie van de Isabellavaart kaarten opgesteld voor verschillende terugkeerperiodes en werd ook de invloed van de onzekerheden in kaart gebracht [HydroScan 2006].

Conclusie

Indien men beschikt over waterhoogtemetingen en een DHM, is het mogelijk om risicokaarten voor overstromingen op te maken welke nauwkeuriger zijn dan de kaarten die op ROG-zones zijn gebaseerd, ook na de correctie van de ROG-kaarten met het DHM. Het voordeel van de door HydroScan uitgewerkte methodologie is dat er rekening wordt gehouden met de hydraulica van het afwateringssysteem en met de kans op voorkomen van de overstromingen. Dit kan een alternatief zijn voor kleinere waterlopen die nog niet zijn gemodelleerd of nooit zullen worden gemodelleerd.

Dankwoord

Deze studie kwam tot stand met medewerking van de gemeente Knokke-Heist [HydroScan, 2006].

Referenties

- AGIV (2006). Overstromingsgebieden in Vlaanderen. Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen, geo-vlaanderen.agiv.be/geo-vlaanderen/overstromingskaarten.
- Berlamont J., Willems P., Qvick A., Vaes G., Feyen J. & Christiaens K. (2000). Algemene methodologie voor het modelleren van de waterafvoer in bevaarbare waterlopen in Vlaanderen. Studie in opdracht van Administratie Waterwegen en Zee- wezen, april 2000.
- CIW (2004). Toelichting betreffende het toepassingsgebied en de toepassing van de water- toets. CIW Werkgroep Watertoets, 22 september 2004.
- HydroScan (2006). Bepaling van de risicozones voor overstromingen in het stedelijk gebied van Knokke-Heist. Studie in opdracht van de gemeente Knokke-Heist, juni 2006.
- Vlaamse Overheid (2006). Risicozones overstro- ming : begeleidende nota. 29 augustus 2006.

dr. ir. Guido Vaes

Tiensevest 26/4, 3000 Leuven, tel 016 24 05 01
Projectmanager, HydroScan NV, Tiensevest 26/4,
3000 Leuven,
tel 016 24 05 05, fax 016 24 05 09

Tom Feyaerts

Tiensevest 26/4, 3000 Leuven, tel 016 24 05 03
Projectmanager, HydroScan NV, Tiensevest 26/4,
3000 Leuven,
tel 016 24 05 05, fax 016 24 05 09

